

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní

Katedra materiálů

Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství

Obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**Vliv odplynění slitiny AlSi10Mg (EN AC 43000) na její vlastnosti při  
gravitačním odlévání do kovové formy**

**Influence of degasification AlSi10Mg alloy (EN AC 43000) on  
characteristics at gravity-die casting**

**DAVID DUŽDA**

**KMT 224**

Vedoucí práce: doc. Ing. František Stuchlík, Csc.

Konzultant: Ing. Jiří Crha

LIBEREC 2007

**ANOTACE:**

Tématem práce je určení vlivu odplynění na mechanické vlastnosti u slitiny AlSi10Mg. Teoretická část se zabývá obecným přehledem nejčastěji používaných hliníkových slitin ve slévárenství, vlivem jednotlivých přísad a příměsí na vlastnosti slitin a jejich značením dle ČSN EN 1706. Dále popisuje problematiku naplynění slitin, způsoby odplyňování a případy kdy se provádí naplyňování. V praktické části jsem provedl měření tvrdosti, meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti u čtyř reprezentativních druhů ošetření taveniny. Práce obsahuje i snímky mikrostruktury jednotlivých druhů tavenin.

Klíčová slova: siluminy, slitina AlSi10Mg, odplynění, porezita, plyny v hliníku

**ANNOTATION:**

The topic of this thesis is determination of the influence of degasification on mechanical characteristics of alloy AlSi10Mg at gravity-die casting. The theoretical part deals with general summary of the most commonly used aluminium alloys in foundry industry and with the influence of other ingredients and foreign substances on the characteristics of the alloy and their codes in accordance with the Czech Standard ČSN EN 1706. Further are discussed the issues of gas content in alloys, methods of degasification and cases when gas saturation is carried out. In the practical part measurements of hardness, yield value, ultimate strength and elongation of four representative kinds of smelt were carried out. The thesis includes pictures of microstructure of each smelt sample.

Keywords: silumins, AlSi10Mg alloy, degasification, porosity, gases in aluminum

V úvodu této práce bych rád poděkoval firmě Unitherm s.r.o. sídlící v Jablonci nad Nisou za to, že mi poskytla zázemí na provedení diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Technické univerzitě v Liberci a zaměstnancům katedry materiálu za podporu při provádění praktických zkoušek. V poslední řadě bych rád poděkoval svému konzultantovi Ing. Jiřímu Crhovi a vedoucímu mé práce panu doc. Ing. Františku Stuchlíkovi za vedení při řešení a vypracování této práce.

# OBSAH

Strana

## TEORETICKÁ A REŠERŽNÍ ČÁST

1.	Výroba a historie používání hliníku a jeho slitin	3
2.	Vlastnosti čistého hliníku	4
3.	Teorie slévárenských hliníkových slitin	7
3.1	Vliv přísad na vlastnosti slitin hliníku	10
3.2	Rozdělení slitin hliníku	15
4.	Označování slévárenských slitin hliníku	17
4.1	Číselné značení slitin dle ČSN EN 1706	17
4.2	Značení slitin chemickými značkami dle ČSN EN 1706	18
5.	Typy slévárenských slitin hliníku a jejich charakteristika	19
5.1	Slitiny typu Al-Cu a Al-Cu-Si	19
5.2	Slitiny typu Al-Mg	20
5.3	Slitiny typu Al-Zn a Al-Zn-Mg	20
5.4	Slitiny typu Al-Si-Cu	21
6.	Slitiny typu Al-Si	22
6.1	Slitiny typu Al-Si-Mg	23
6.1.1	Slitina AlSi10Mg (EN AC-43000)	25
7.	Plyny ve slitinách hliníku	28
7.1	Zdroje vodíku	28
7.2	Mechanismy vzniku plynových dutin v odlitcích	30
7.3	Porezita v odlitcích	31
7.4	Odplyňování hliníkových slitin	34
7.5	Způsoby odplyňování aktivními a neutrálními plyny	36
7.6	Naplyňování taveniny	37



**PRAKTICKÁ ČÁST**

8.	Cíle práce	38
8.1	Spektrální analýza	40
8.2	Naplynění vzorků	43
8.3	Měření tvrdosti	46
8.4	Měření meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti	50
8.5	Mikrostruktura	55
9.	Závěr	66
	Seznam použité literatury	69

# TEORETICKÁ A REŠERŽNÍ ČÁST

## 1. Výroba a historie používání hliníku a jeho slitin

[3,6,7,8]

Jedním z nejrozšířenějších kovů vyskytujících se v přístupné části zemské kůry je hliník. Vyskytuje se zde v množství, které činí asi 8% (zaujímá tak třetí místo za kyslíkem a křemíkem) a je vázán ve formě sloučenin jako jsou např. bauxit, kryolit, spinely, kaolin apod. Jako základní surovina na výrobu hliníku se používá bauxit (podle svého naleziště, města Les Baux - Francie) – hydratovaný oxid hlinitý, s obsahem oxidů železa, křemíku a titanu, v němž obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bývá kolem 50%. Odtud se hliník získává elektrolýzou roztoku hlinitého v roztavených fluoridech.

Výrobní proces se skládá z následujících etap:

- 1) výroba oxidu hlinitého z hlinitanových rud; proces se skládá z mletí, chemického zpracování hlinitanových rud loužením a následného žíhání na  $1200-1300^\circ\text{C}$
- 2) redukce oxidů na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu, kterým je roztavený kryolit ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) a v něm rozpuštěný oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) při teplotě  $950-970^\circ\text{C}$

Proces výroby hliníku je velmi energeticky náročný. Např. k výrobě 1 t hliníku je zapotřebí asi 4 t bauxitu, zhruba 20GJ tepelné energie a 14 MWh elektrické energie. Takto získaný hliník je čistoty až 99,9%.

Z hlediska historického je používání hliníku, oproti jiným kovům, velmi krátké.

- Poprvé byl hliník laboratorně získán chemickou redukcí draslíku roku 1825 dánským fyzikem a chemikem Hansem Christianem Oerstedem.
- Roku 1854 Francouz Henri Saint-Claire Deville vyrábí za finanční podpory císaře Napoleona III. již technicky významnější množství (tyč hmotnosti 1 kg). Tento výrobek představuje veřejnosti o rok později na světové výstavě. Cena se pohybovala okolo 2000 franků.
- Výrobu hliníku elektrolýzou bauxitu v roztaveném kryolitu nezávisle na sobě patentují roku 1886 Francouz Paul T. Héroult a Američan Charles M. Hall. Této metody se používá k výrobě hliníku dodnes.
- První hutě byly postaveny v letech 1887-8, které znamenají prudký rozvoj průmyslové výroby hliníku.

- Roku 1887 byl použit hliníkový plech na stavbu vzducholodí.
- Od roku 1903 začínají pokusy s využitím hliníku v konstrukci motorů, zejména pak pro výrobu pístů.
- Snahy o výrobu slitin se zvýšenými pevnostními vlastnostmi pomocí tepelného zpracování se datují do roku 1906, kdy bylo objeveno tzv. vytvrzování, kterým se u slitiny AlCu4Mg podařilo dosáhnout tvrdosti až 110 HB.
- 1921 objevuje Pacz metodu zjemnění eutektika slitin Al-Si modifikací sodíkem, která má za následek výrazné zlepšení pevnosti, tvrdosti a tažnosti.
- K velkému rozvoji výroby hliníkových slitin dochází v důsledku obou světových válek, kdy dochází k masivní výrobě letadel.
- Ve 20. a 30. letech minulého století se začíná věnovat pozornost recyklaci hliníkových slitin. V této souvislosti se vyvíjejí slitiny typu AlSiCu, později označované jako slitiny druhého tavení.

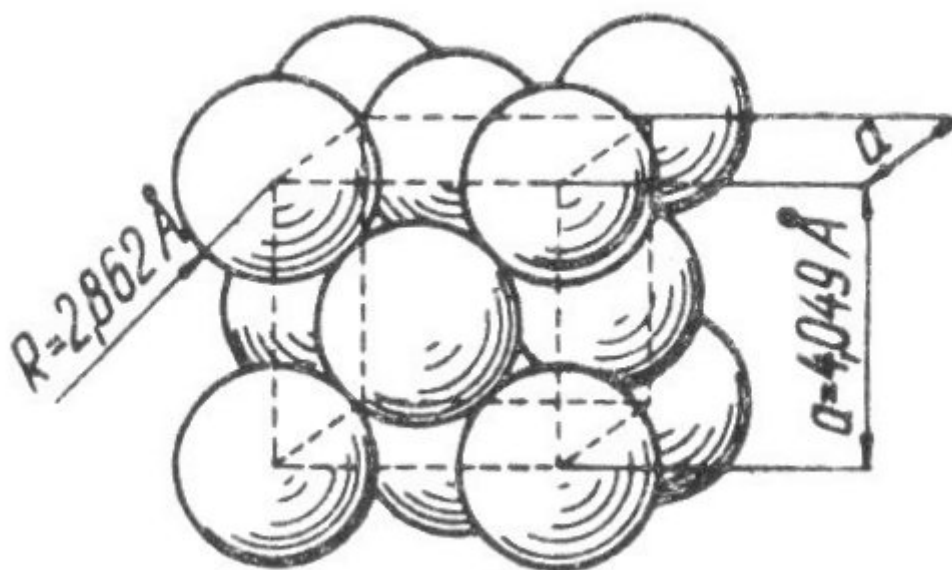
Po 2. světové válce dochází k prudkému nárůstu výroby hliníkových odlitků díky rozšíření technologie lití do kovových forem, převážně tlakovým litím. Touto metodou se v současné době vyrábí přibližně 50% z celkové tonáže hliníkových odlitků. Přibližně druhou polovinu z celkové produkce tvoří odlitky vyráběné gravitačním a nízkotlakým litím. Podíl odlitků litých do pískových forem je poměrně malý (asi 5%). Největším odběratelem odlitků z hliníku je automobilový průmysl, kde v automobilech tvoří asi 10% z celkové hmotnosti. Dalším odběratelem hliníku a jeho slitin je průmysl elektrotechnický a spotřební.

## 2. Vlastnosti čistého hliníku

[1,2,3,9]

Čistý hliník zaujímá v periodické soustavě prvků první místo v třetí periodě, v třetím sloupci mezi hořčíkem a křemíkem. Je to kov stříbrolesklý a lehký, slabě paramagnetický. Má velmi dobré optické vlastnosti, např. dobrou odrazovou schopnost pro paprsky všech vlnových délek. Tvářitelnost za tepla i za studena, stejně tak i svařitelnost, je velmi dobrá. Pro výrobu odlitků se však pro svou špatnou slévateľnost, danou velmi dobrou tepelnou vodivostí, nehodí. Obrobitelnost čistého hliníku vlivem rozdílné struktury je horší než u jeho slitin. Přítomnost precipitátů, konstitučních fází, měkkých částic i případného deformačního zpevnění činí slitiny hliníku lépe obrobitelnými než jak je tomu u hliníku čistého.

Nad teplotou tání se nachází hliník ve stavu tekutém, atomy jsou prostorově dokonale neuspořádány a jsou v neustálém pohybu. Rychlost pohybu atomů je tím vyšší, čím více je překročena teplota tavení a je tedy závislá na množství dodané tepelné energie. Při zastavení dodávky tepla teplota kovu klesá a při dosažení teploty tavení u čistého hliníku dochází ke krystalizaci v soustavě kubické plošně centrované. Elementární buňka je tvořena 14 atomy, z nichž každý je obklopen 12 nejbližšími sousedními atomy.



Prostorové rozmístění atomů hliníku v základní krystalové mřížce čistého hliníku (kubická plošně centrovaná soustava) [2]

Jednotlivé atomy jsou u hliníku v pevném stavu vázány na určitou polohu a vazba mezi nimi se označuje jako kovová. Tato vazba se vyskytuje u prvků s malým počtem elektronů ve valenční vrstvě (1 až 3). Podstatou kovové vazby je snadné uvolňování elektronů, kdy rovnováha mezi kladně nabitými zbytky atomů je udržována množinou odtržených elektronů (elektronovým plynem). Přítomností tohoto plynu se vysvětluje dobrá elektrická a tepelná vodivost kovů.

Tato skutečnost se projevuje i u čistého hliníku, který svojí tepelnou a elektrickou vodivostí patří mezi nejlepší kovy. V tomto ohledu jej překonává pouze stříbro a měď. Při teplotě 20 °C dosahuje tepelná vodivost hodnoty  $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (pro srovnání tepelná vodivost mědi činí  $394 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Pro hliník čistoty 99,99% je při normální teplotě hodnota součinitele elektrické vodivosti  $2,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ , což je asi 60% elektrické vodivosti mědi.

Při ideální krystalizaci vznikají dokonalé elementární prostorové buňky k nimž se připojují další atomy, vytvářející prostorovou mřížku. Atomy zaujímají určité rovnovážné polohy. Ke krystalizaci nedochází okamžitě, ale je k ní potřeba určité doby. Přechodem ze skupenství kapalného na skupenství pevné, tedy ze stavu vnitřní neuspořádanosti na stav uspořádaný podle určitého geometrického systému, dochází ke snížení energie atomů. Tento rozdíl mezi oběma stavy se odevzdá ve formě tepelné energie, která odpovídá hodnotou skupenskému teplu tání. Tato skutečnost se projeví na křivce chladnutí čistého hliníku jako prodleva, která je tím delší, čím větší je množství tuhnoucího materiálu. Obdobná situace nastává při ohřevu kovu. V tomto případě není teplo uvolněno, ale je potřeba jej dodat, aby došlo k roztavení kovu. Další prodlevy se již na křivce chladnutí (ohřevu) nevyskytují, nedochází ani ke změně krystalické mřížky jako je tomu u alotropických kovů jako např. železo, titan, mangan apod. Některé fyzikální vlastnosti hliníku přibližuje následující tabulka [1]:

Hustota	2700 kg.m <sup>-3</sup>
Teplota tání	660 °C
Teplota vypařování	2520 °C
Krystalická mřížka	Kubická plošně centrovaná
Mřížková konstanta	$A = 4,05 \cdot 10^{-10}$ m
Atomové číslo	13
Atomová hmotnost	26,98

Při styku hliníku a jeho slitin se vzduchem se vytváří na povrchu součásti slabá pasivační vrstva oxidu  $Al_2O_3$ . Tloušťka této vrstvy dosahuje asi 10 nm. Odolnost vůči korozi je pak dána odolností vrstvy  $Al_2O_3$  vůči prostředí v němž se součást nachází. Hliník a jeho slitiny velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a v neutrálních roztocích. Naproti tomu v prostředí kyselin a zásad, díky amfoternímu charakteru oxidu  $Al_2O_3$ , je odolnost hliníku a jeho slitin malá. Při styku se zásadami se vrstva rozpouští a vznikají hlinitany. V prostředí kyselin se naopak tvoří soli. Výjimku tvoří kyseliny silně oxidačního charakteru, jako např.  $HNO_3$ , u nichž může docházet k pasivaci kovu, tj. k zesílení vrstvy oxidu. U čistého hliníku a jeho slitin se může vyskytnout elektrochemická koroze a to v důsledku přítomnosti pórů ve vrstvě oxidu. Zde vznikají mikročlánky typu vrstvička-pór, kde pór tvoří anodu. Jiné typy mikročlánků se též vyskytují u vícekomponentních slitin, jež jsou způsobeny strukturní nesourodostí materiálu, nebo při výskytu trhlin a puklin na povrchu kovu. Slitiny hliníku

(obzvláště z mědí) jsou náchylné k mezikrystalické korozi, vedoucí k rozrušení kovu na hranicích zrn. Tuto mezikrystalickou korozi omezují některé legury jako např. hořčík.

### 3. Teorie slévárenských hliníkových slitin

[1,2,3,5,6,11]

Hliník a všechny jeho slitiny krystalizují v kubické, plošně centrované soustavě. U kterékoliv slitiny hliníku je v oblasti tuhého roztoku nahrazen jeden nebo více atomů hliníku atomem přísadového kovu – vznikají substituční tuhé roztoky. Přítomností takovýchto cizích atomů má za následek deformaci základní mřížky. Deformací mřížky je omezován deformační mechanismus (kluzy, průchod mřížkových poruch-dislokací) a proto vzrůstají pevnostní vlastnosti. Ovšem houževnatost (tažnost, kontrakce) se zhoršují.

Slévárenské slitiny hliníku obsahují pro zlepšení technologických vlastností (např. slévatelnost, obrobitelnost apod.) velké množství legur (až 25%). To má obvykle za následek překročení oblasti tuhého roztoku a ve struktuře se objevují útvary tvrdých intermediárních fází, které svojí přítomností zvyšují tvrdost.

Přehled některých intermediárních fází vyskytujících se u binárních slitin je uveden v následující tabulce:

Intermediární fáze u binárních slitin [5]

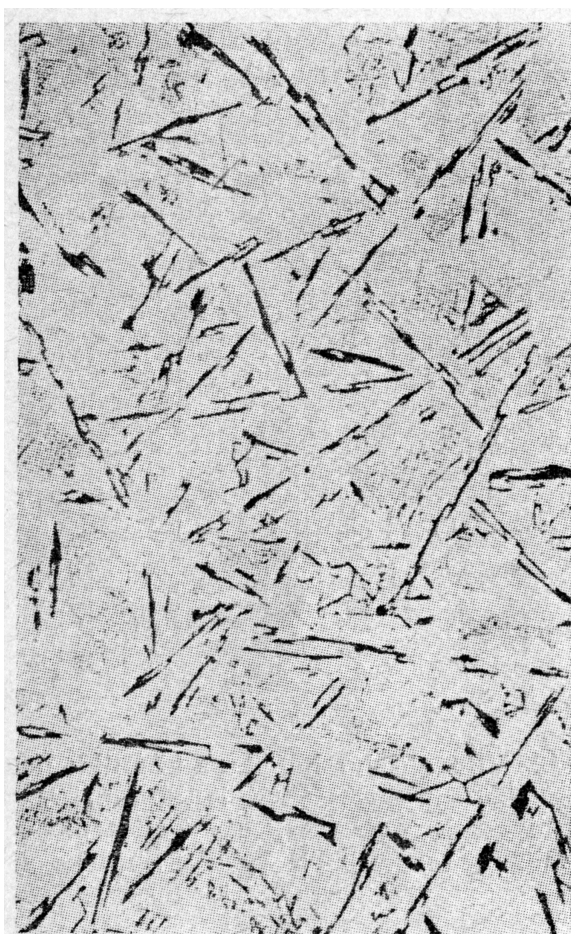
Přísadový prvek	Složení fáze
Si	Si *)
Cu	CuAl <sub>2</sub>
Mg	Mg <sub>3</sub> Al <sub>8</sub>
Zn	Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>
Mn	MnAl <sub>2</sub>
Ni	NiAl <sub>3</sub>
Cr	CrAl <sub>7</sub>
Fe	FeAl <sub>3</sub>
Ti	TiAl <sub>3</sub>

\*) primární nadeutektický křemík

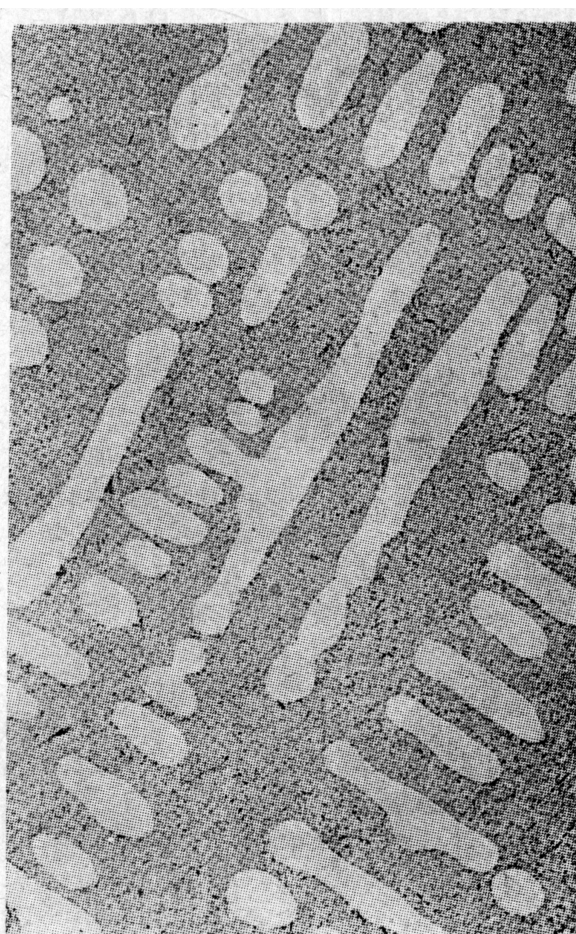
Kromě přísad lze ovlivňovat vlastnosti hliníkových slitin i tím jakým způsobem byla struktura zjemněna. Čím je struktura jemnější, tím lepší jsou i výsledné mechanické vlastnosti. Jedním

z činitelů, které ovlivňují tuto skutečnost je rychlost ochlazování během procesu tuhnutí. V tomto případě značně pomáhají přísady kovů, které působí dalším zjemňujícím účinkem, a to buď zjemněním základního zrna (tj. u běžných slitin dendritů), nebo zjemněním některých druhů strukturních složek. K zjemnění základního zrna se používají přísady kovů s vysokým bodem tání (např. titan, chrom, vanad apod.). Zjemnění některých druhů strukturních složek se docílí přidáním např. sodíku nebo fosforu, které modifikují krystalizaci eutektika slitin AlSi, případně zjemňují krystalizaci nadeutektického křemíku. Množství v jakém se do slitin tyto prvky přidávají se pohybuje řádově v setinách nebo desetinách procenta.

a)



b)



Vliv modifikace slitiny Al-Si13 na charakter mikrostruktury (zvětšeno 100krát):

a) struktura bez modifikace

b) struktura odlitku po modifikaci

[2]

Dalším způsobem, jak zvyšovat pevnostní vlastnosti hliníkových slitin je možnost tepelného zpracování – vytvrzování. Vytvrditelné jsou pouze ty slitiny, které vykazují s teplotou omezenou rozpustnost přísadového prvku v oblasti tuhého roztoku. Jestliže slitinu s patřičným obsahem přísady rychle ochladíme, docílíme toho, že přísada zůstane přechlazená v tuhém roztoku. Tato skutečnost se projeví deformací mřížky. Po určité době a to buď za normální teploty, nebo za teploty zvýšené, která celý pochod urychlí, dojde v důsledku difúze k precipitaci intermediárních fází, které brzdí pohyb dislokací a tím zvyšují pevnost a tvrdost. Legury, umožňující vytvrzování hliníkových slitin jsou hlavně Cu, Ni, Mg, Zn a Si.

Ve slitinách hliníku se také vyskytují kromě prvků záměrně přidávaných (legur) i tzv. doprovodné prvky (nečistoty), které nám naopak vlastnosti zhoršují. Zdrojem těchto nečistot může být např. materiál vyzdívky nebo kelímku, dále použité slévárenské nářadí, přípravky na ošetření taveniny nebo nepřítliš pečlivě druhovaný vratný materiál apod. Mezi takovéto doprovodné prvky patří u slitin hliníku např. železo. Je-li fáze Al-Fe objevující se ve slitině přítomna ve formě dlouhých jehlicovitých nebo deskovitých útvarů, dochází k narušení homogenity slitiny, které může vést k předčasnému lomu. K lomu dochází na hranicích těchto útvarů intermediárních fází. Výsledkem je pak samozřejmě snížení mechanických vlastností. Běžně se obsah železa omezuje na 0,6% (např. u vysokopevnostních slitin typu AlCu se snižuje obsah železa pod 0,2%, někdy je dokonce požadavek maximálního obsahu prvku 0,05%). Pouze u slitin pro tlakové lití je tolerován obsah vyšší z důvodu snížení nalepování odlitku na formu a současně ke zvýšení životnosti formy. Jako nejběžnější přísady používané k omezení nepříznivého vlivu železa se používá např. mangan, kobalt nebo berylium. Další nepříznivé prvky vyskytující se u hliníkových slitin se považují některé těžké kovy s nízkou teplotou tání, např. olovo, cín, kadmium.

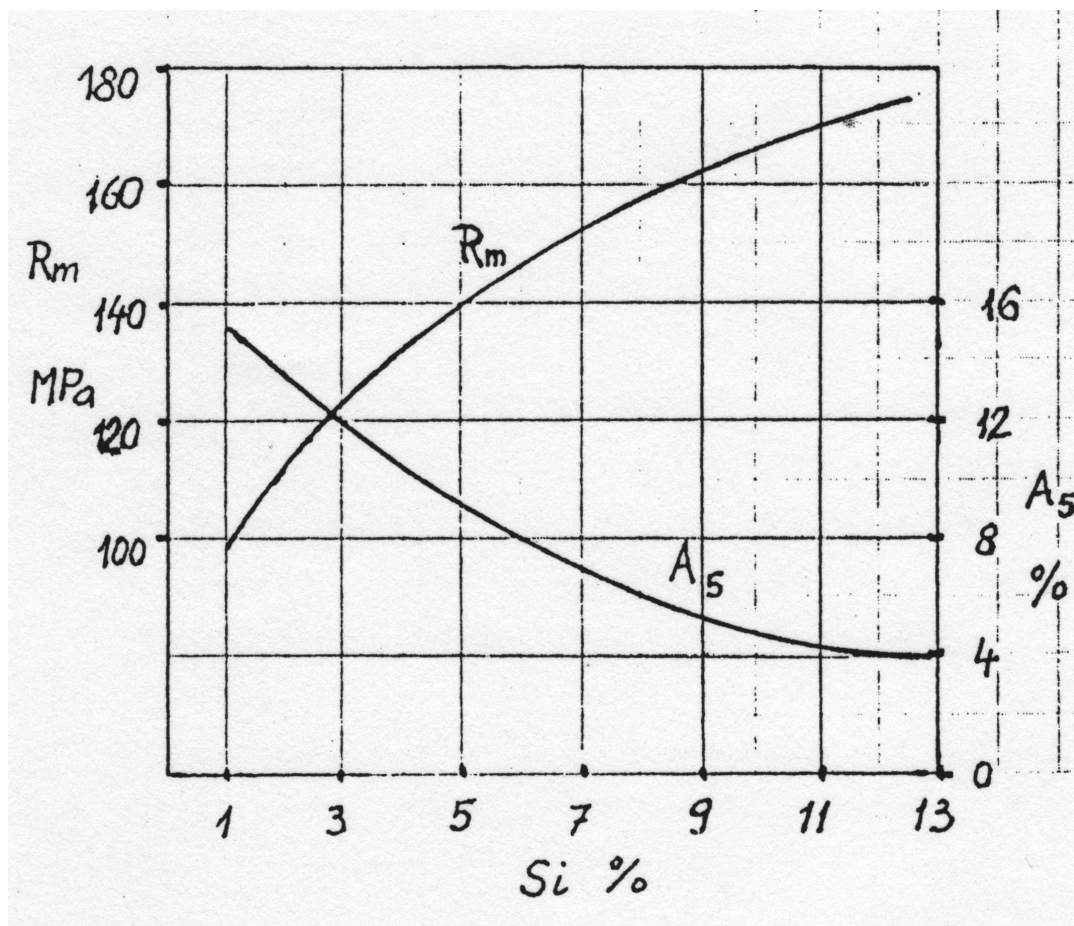
Pojem nepříznivě působících doprovodných prvků je ovšem značně relativní, neboť jejich působení silně závisí na typu slitiny. Např. příznivě působící obsah mědi u slitin AlCu nebo AlSiCu zhoršuje korozní odolnost slitin AlMg a je zde pokládán za doprovodný prvek. Křemík, který je základní přísadou u slitin typu AlSi způsobuje u slitin AlCu snížení mechanických vlastností.



### 3.1. Vliv přísad na vlastnosti slitin hliníku

#### Křemík

Jeden ze základních přísadových prvků. Zlepšuje slévatelnost, příznivě ovlivňuje zabíhavost, sklon k tvoření trhlin za tepla i prasklin za studena. Dále omezuje vznik vad typu dutin a zvyšuje pevnostní vlastnosti.



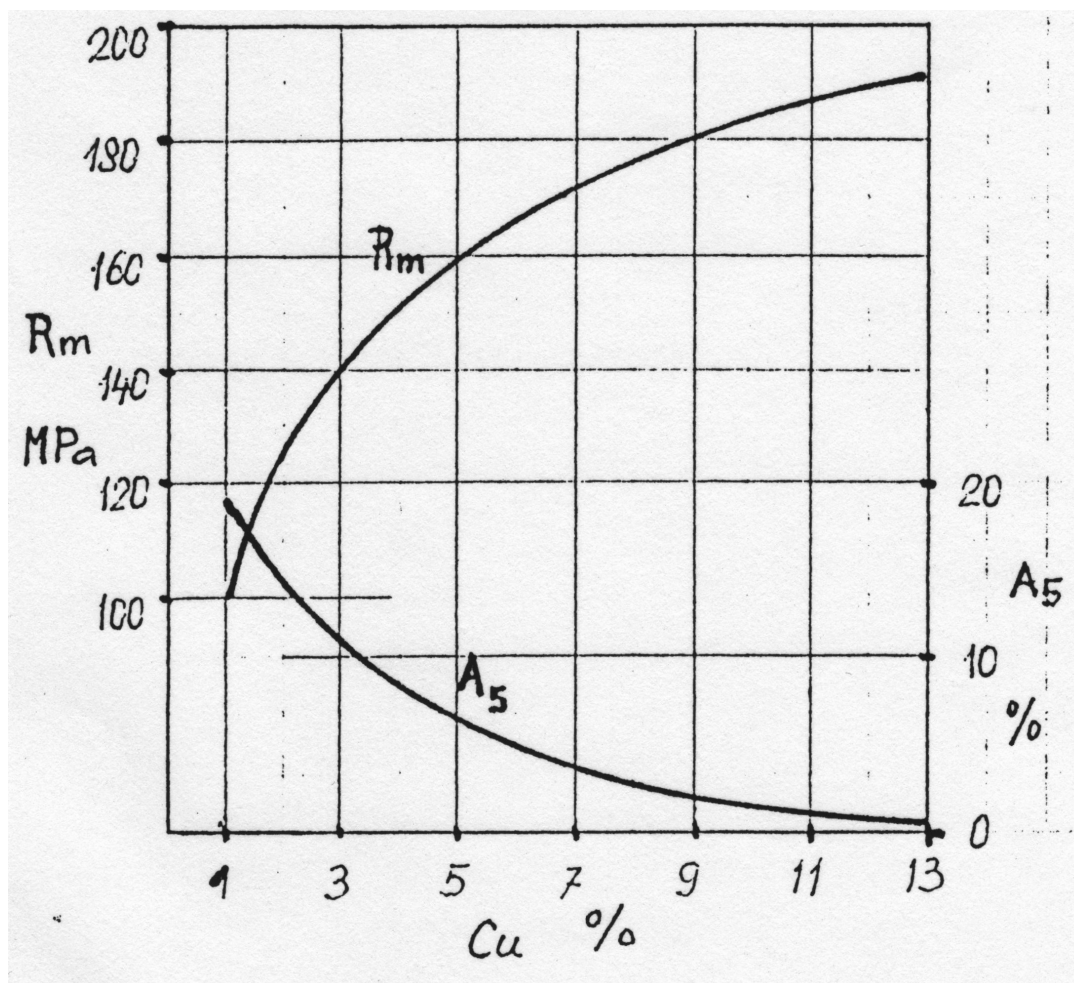
Vliv obsahu křemíku na pevnost a tažnost slitin AlSi [5]

Používaný obsah křemíku je 5 až 25% (nejčastěji 7 až 13%). U nadeutektických slitin se vysoký obsah křemíku projevuje vysokou odolností proti otěru a dobrými kluznými vlastnostmi.

#### Měď

Její přítomnost zvyšuje pevnost a tvrdost, ale snižuje houževnatost. S rostoucím obsahem mědi se zhoršuje korozní odolnost a většinou i slévárenské vlastnosti. Slitiny jsou náchylné ke vzniku trhlin a prasklin, dále vad typu dutin (staženiny, řediny). Obsahy tohoto prvku běžně

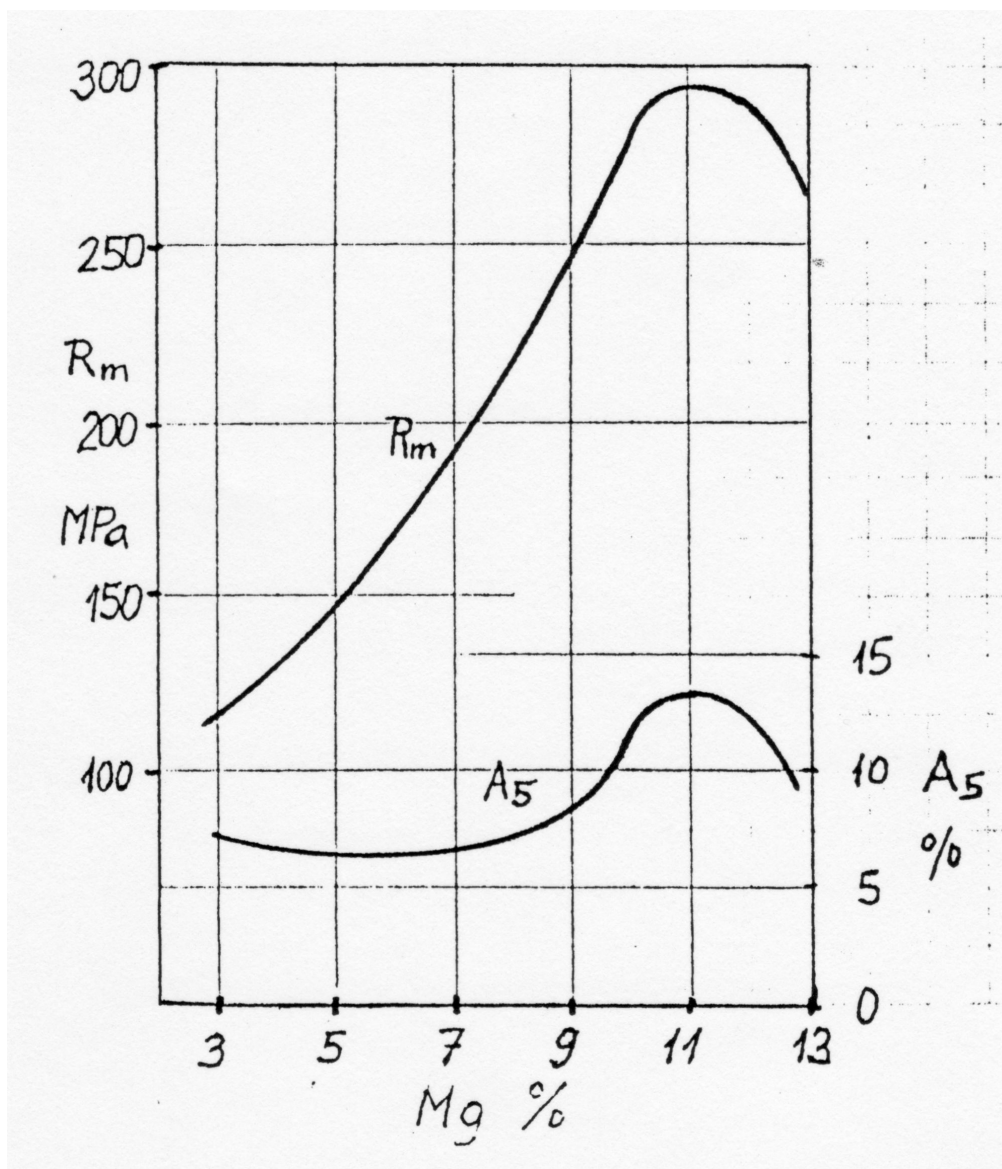
používané se pohybují v rozmezí 0,5 až 10%. K vytvrzování se používají slitiny s obsahem mědi obvykle kolem 4%.



Vliv obsahu mědi na pevnost a tažnost odlitků do kovové formy. [5]

## Hořčík

Slitiny typu AlMg jsou aplikovány při požadavcích na vysokou korozní odolnost a dekorativní vzhled povrchu. Vzhled povrchu je možno upravovat různými způsoby, z nichž převládá anodická oxidace (eloxování), kdy je možné barvit povrch na libovolný odstín včetně velmi světlých barev. S rostoucím obsahem hořčíku roste pevnost a houževnatost.



Vliv obsahu hořčíku na pevnost a tažnost. [5]

Tepelné zpracování se provádí u slitin s obsahem hořčíku nad 7% z důvodu docílení požadovaných mechanických vlastností a pro zaručení dostatečné rozměrové stability. Určitou výjimku tvoří slitiny pro tlakové lití, které z důvodu nebezpečí vzniku defektů tepelně zpracovávat nelze. Nepříznivou vlastností hořčíku je jeho vysoká afinita ke kyslíku, která vzrůstá s rostoucí teplotou. Tento jev se zmírňuje malými přísadami berylia nebo vápníku. Pro slitiny typu AlSi a AlZn a jejich možnost tepelného zpracování se nejčastěji používá množství přísady hořčíku od 0,3% až do 0,7%. Přibližně ve stejném množství se příznivě projevuje přítomnost hořčíku i u slitin typu AlCu, tedy slitiny typu AlCuMg.

## **Zinek**

Binární slitiny s tímto prvkem se všeobecně nepoužívají, neboť přítomnost zinku ve slitině ovlivňuje mechanické vlastnosti jen ve velmi omezené míře. V zahraničí se používá např. slitina AlZnMg (5 až 8% Zn a 0,5 až 2% Mg). Spolu s hořčíkem vytváří intermetalickou fázi  $MgZn_2$ .

## **Nikl**

Používá se v množství 1 až 2% a to v kombinaci s mědí. Tyto slitiny jsou pak určeny pro provoz za zvýšených teplot, neboť přítomnost niklu a mědi příznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti. Dále jeho přítomnost v menší míře snižuje součinitel teplotní roztažnosti.

## **Kobalt**

Jeho účinky jsou obdobné jako u niklu. Současně do určité míry příznivě působí na krystalizaci intermediárních fází typu AlFe.

## **Stříbro**

Běžně používané množství se pohybuje kolem 0,5 až 1% u slitin typu AlCuMg. Příznivě ovlivňuje vytvrzovací pochody a umožňuje dosažení maximálních hodnot pevnostních vlastností.

## **Cín**

Je doprovodným prvkem většiny běžně používaných slitin. Používá se jako základní legura u slitin určených pro kluzná ložiska. V některých případech bylo zjištěno, že nízké obsahy cínu příznivě ovlivňují vytvrzovací pochody.

## **Lithium**

Není příliš běžnou přísadou u slévarenských slitin. U slitin určených k tváření se jeho použití začíná rozvíjet. Přítomnost lithia ve slitinách zvyšuje efekt vytvrzení a hodnoty modulu pružnosti a snižuje měrnou hmotnost slitiny. Tyto výhody jsou důležité především pro letectví a kosmonautiku.

## **Berylium**

Nízké přísady berylia příznivě působí na potlačení nepříznivého vlivu železa a snižují náchylnost k oxidaci. Vzhledem k obávané toxicitě jsou jeho aplikační možnosti omezeny pouze na případy, kdy odlitky nepřicházejí do styku s potravinami.

## **Mangan**

Hlavní úlohou je kompenzace nepříznivého vlivu železa potlačením jeho vyloučení v destičkovitém tvaru a vytvoření intermetalické fáze  $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_6$ . Jeho přítomností ve slitině dochází ke zvýšení pevnostních vlastností, zvýšení teploty rekrystalizace, zjemnění zrna nebo blokování růstu zrn v případě jeho vyloučení ve formě disperzních precipitátů.

## **Železo**

Běžně se považuje za doprovodný prvek. Výjimečně se lze setkat s jeho záměrnými přísadami a to v množství 1 až 2%. Zde se používá pro slitiny, které pracují za zvýšených teplot pro příznivé ovlivnění pevnostních vlastností a odolnosti vůči tečení

## **Titan, Vanad, Chrom, Bór, Zirkonium**

Tyto kovy s vysokým bodem tání se používají u slévárenských slitin hliníku pro zjemnění zrna. V některých případech se jich také využívá ke stabilizaci precipitátů vzniklých při vytvrzování vůči zvýšené teplotě.

## **Antimon**

Používá se k modifikaci eutektika u slitin  $\text{AlSi}$ . I když je považován za doprovodný prvek, byl prokázán jeho příznivý vliv na stabilizaci důsledku vytvrzovacích pochodů. Z tohoto důvodu je přidáván i do slitin pracujících při zvýšené teplotě. Ve výjimečných případech se aplikuje spolu s cínem, olovem a kadmiem za účelem zlepšení třískové obrobitelnosti u tzv. slévárenských automatových slitin. Dále zvyšuje odolnost proti korozi v mořské vodě a snižuje náchylnost slitin  $\text{AlMg}$  ke vzniku trhlin za tepla.

## **Olovo, kadmium, vizmut**

Jsou považovány za doprovodné prvky se silně nepříznivým vlivem na houževnatost odlitku. Mohou se použít pro zvýšení třískové obrobitelnosti. V případě kadmia byl prokázán příznivý vliv na vytvrzovací efekt u slitin typu  $\text{AlCu}$ .

## Sodík, stroncium, vápník a fosfor

Sodík, stroncium a vápník se používají jako základní modifikátory eutektika AlSi. Fosfor je používán jako základní zjemňující činidlo primárního křemíku u nadeutektických slitin tohoto typu. U slitin typu AlMg se používá vápník ke snížení sklonu k oxidaci.

### 3.2. Rozdělení slitin hliníku

Hliník a jeho slitiny krystalizují v soustavě krychlové plošně centrované. Slitiny hliníku je možno dělit podle nejrůznějších kritérií. Nejpoužívanější kritérium dělení slitin hliníku je podle způsobu zpracování. Takto lze slitiny hliníku rozdělit na slitiny určené k tváření a slitiny slévarenské. Ve slitinách hliníku určených k tváření se maximální obsah legujících prvků pohybuje kolem 11 % a ve slitinách určených k odlévání kolem 24 %. Dalším používaným kritériem dělení slitin hliníku je podle schopnosti zvýšení tvrdosti a pevnosti tepelným zpracováním na slitiny hliníku vytvrditelné a nevytvrditelné. Určité přiblížení problému rozdělení slitin hliníku přibližuje následující obrázek.

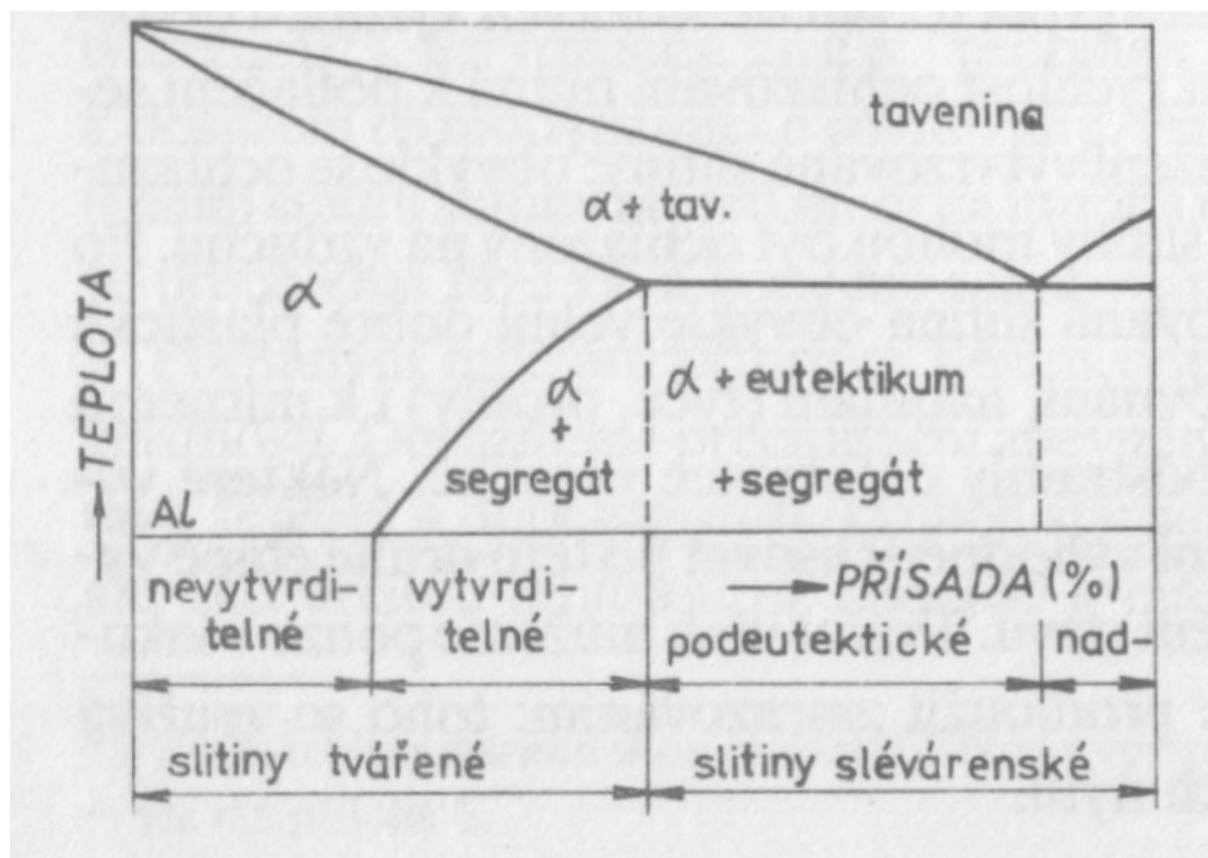


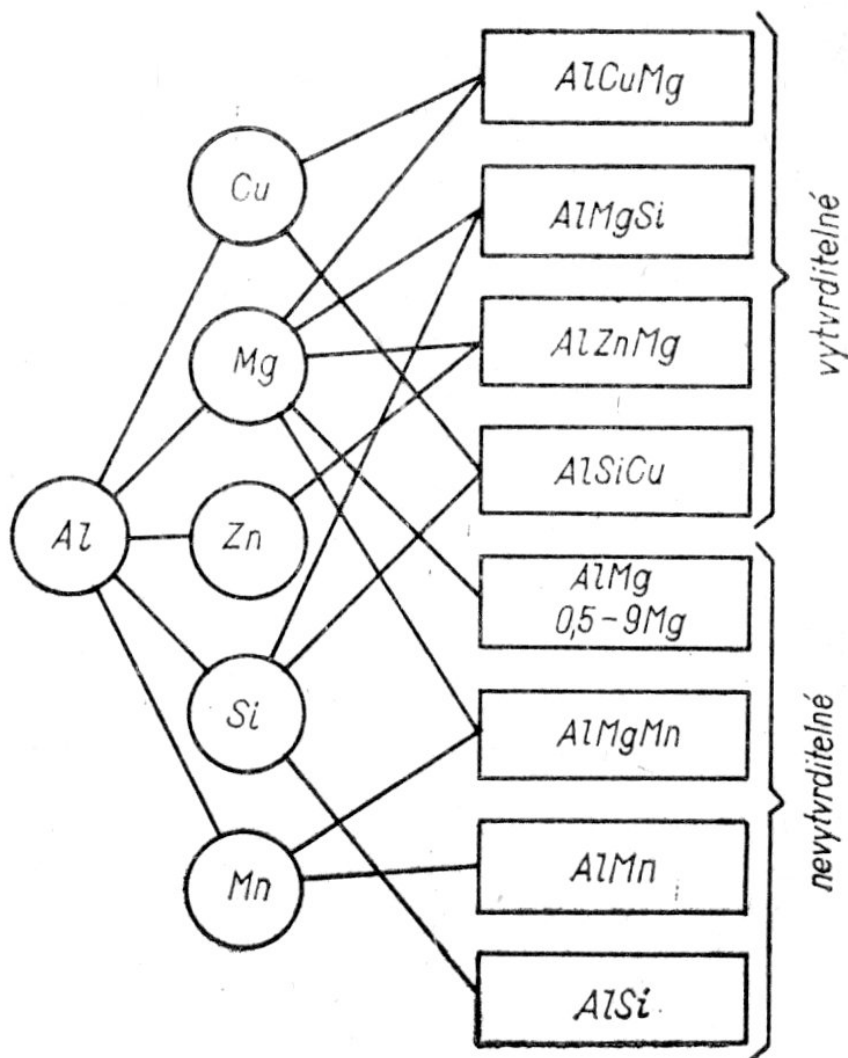
Schéma binárního rovnovážného diagramu Al – přísada [11]

Mezi nejpoužívanější legury patří Mg, Si, Cu, Mn a Zn. Kromě tvrdosti a pevnosti lze těmito legurami ve výsledné slitině ovlivnit i některé další vlastnosti jako např. vlastnosti technologické (slévateľnost, tvářiteľnost, obrobiteľnost, svařitelnost aj.) nebo užitné vlastnosti jako odolnost proti korozi, elektrickou vodivost apod.

Podle hlavních přísadových prvků lze slitiny hliníku též dělit na:

- slitiny Al-Si - siluminy
- slitiny Al-Cu - duralaluminium
- slitiny Al-Mg - hydronalium

Přehled nejčastěji používaných slitin s čistým hliníkem uvádí následující obrázek:



Přehled nejčastěji používaných slitin s čistým hliníkem. [3]

Podle počtu legur (hlavních přísadových prvků) lze dále slitiny hliníku dělit na:

- binární slitiny – obsahují základní a hlavní přísadový prvek
- ternární slitiny – obsahují základní prvek, hlavní přísadový prvek a jeden vedlejší prvek
- vícesložkové slitiny – obsahují několik vedlejších přísadových prvků

## **4. Označování slévárenských slitin hliníku**

[1]

Od roku 2000 jsou v ČR slévárenské slitiny hliníku normovány dle evropské normy ČSN EN 1706. Tato norma nahradila dřívější normu ČSN 42 43xx a 42 45xx. Další často užívané značení v českých slévárnách je dle původní německé normy DIN 1725, které používá rovněž Vereinigung Deutscher Schmelzhütten – VDS. Méně časté je používání označení slitin hliníku dle amerických norem ASTM nebo jiných normalizačních systémů.

Dle ČSN EN 1706 se slitiny značí buď číselně, nebo chemickými značkami.

### **4.1 Číselné značení slitin dle ČSN EN 1706**

Označení se skládá z písmen **EN AC** a pětímístného čísla, jehož tvar je:

**EN AC-XXXXX**

Význam jednotlivých číslic:

- První číslice charakterizuje hlavní přísadový prvek a to:  
2 – slitiny AL-Cu  
4 – slitiny Al-Si  
5 – slitiny Al-Mg  
7 – slitiny Al-Zn
- Druhá číslice udává skupinu slitin a prakticky se využívá pouze u slitin Al-Si.
- Třetí číslice je pořadové číslo ve skupině.
- Čtvrté a páté číslice jsou 0.



## 4.2 Značení slitin chemickými značkami dle ČSN EN 1706

Označení se skládá z úvodního **EN AC-Al** a dále se uvádějí přísadové prvky v pořadí od hlavní k vedlejším přísadám v sestupném pořadí. Je-li obsah přísady nad 1%, udává se číslicí za značkou příslušného prvku. Je-li obsah nižší než 1%, číslo se za značku neuvádí.

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé skupiny slitin hliníku k odlévání a jejich číselné označení a označení chemickými značkami. Vyskytuje-li se ve skupině více slitin, v tabulce je u číselného označení tato skutečnost naznačena křížky na 3. až 5. místě. U označení pomocí chemických značek jsou v závorce uvedeny další obsahy daného prvku v různých slitinách této skupiny.

Skupina slitin	Označení slitiny	
	Číselné	Chemickými značkami
AlCu	EN AC-21xxx	EN AC-Al Cu4
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42xxx	EN AC-Al Si7Mg0,3(0,6)
AlSi10Mg	EN AC-43xxx	EN AC-Al Si10(9)Mg
AlSi	EN AC-44xxx	EN AC-Al Si12(11)
AlSi5Cu	EN AC-45xxx	EN AC-Al Si6(5)Cu4(3,1)
AlSi9Cu	EN AC-46xxx	EN AC-Al Si9(7,11)Cu3(2,1)
AlSi(Cu)	EN AC-47xxx	EN AC-Al Si12Cu
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg
AlMg	EN AC-51xxx	EN AC-Al Mg3(5,9)
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al Zn5Mg

Způsob značení slitin hliníku k odlévání dle ČSN EN 1706 [1]

## **5. Typy slévárenských slitin hliníku a jejich charakteristika**

[1,2,5]

Slévárenské slitiny, na rozdíl od slitin určených k tváření, jsou charakteristické vyšším obsahem přísad, určitým množstvím eutektika ve struktuře, které zlepšuje jejich slévatelnost a horšími mechanickými vlastnostmi.

Hlavní typy slitin hliníku k odlévání jsou:

1. slitiny typu Al-Si, Al-Si-Mg a Al-Si-Cu
2. slitiny typu Al-Cu a Al-Cu-Si
3. slitiny typu Al-Mg
4. slitiny typu Al-Zn a Al-Zn-Mg

### **5.1. Slitiny typu Al-Cu a Al-Cu-Si**

Vyznačují se vysokou pevností za normální teploty, vysokou tažností a houževnatostí. Typy bez obsahu hořčíku a s přísadou niklu mají dobrou stabilitu mechanických vlastností za zvýšených teplot. Dále se vyznačují dobrou obrobiteľností, poměrně špatnou odolností vůči korozi a mají podmíněnou svařitelnost. (S rostoucím obsahem mědi se obrobiteľnost zlepšuje, ale odolnost vůči korozi se více zhoršuje.)

Slitiny tohoto typu mají špatné slévárenské vlastnosti (sklon ke vzniku rozptýlených staženin a sklon k praskání), které lze do jisté míry kompenzovat přísadou křemíku, jehož koncentrace může dosáhnout až 6 %. Přísadou křemíku se však zhoršují pevnostní vlastnosti slitiny a to jak za normální, tak za zvýšené teploty. Nejčastěji jsou používány slitiny s obsahem 4-5 % mědi, téměř vždy zjemňující přísadou titanu a dále i s přísadami hořčíku případně stříbra. Mechanické vlastnosti a zjemnění zrna lze dále dosáhnout přísadou niklu a zinku.

Slitiny typu Al-Cu se používají na značně namáhané součásti, kterými jsou např. skříně motoru, převodové skříně apod. Slitiny typu Al-Cu-Si mají dobrou odolnost proti opotřebení a vyšší tvrdost. Tyto vlastnosti je předurčují k použití na výrobu pouzder ložisek, řemenic a odlitků rozmanitých tvarů. Slitiny s niklem jsou používány na odlitky pracující za zvýšených teplot, jako jsou např. písty, hlavy válců apod.

Tepelné zpracování se skládá z rozpouštěcího žíhání při cca 530 °C po dobu asi 8 hod., ochlazování se provádí do teplé vody. Vytvrzování za studena na stav T4 se provádí

minimálně 5 dnů, nebo lze kombinovat s vytvrzováním za tepla při 160 °C asi 0,5 až 1 hod. Na stav T6 se vytvrzování za studena provádí 12 až 24 hod., poté při 155 °C po dobu 20 hod.

## **5.2. Slitiny typu Al-Mg**

Obsah hořčíku se pohybuje v rozmezí 3-11 %. Jde o slitiny s velmi dobrou korozní odolností, odolávají působení mořské vody a slabě alkalickému prostředí. Mají horší slévateľnost, která je způsobena náchylností k intenzivní oxidaci a naplynění během tavení i lití, dále reakcemi taveniny s formovacími materiály. Slitiny mají menší zabíhavost a některé složky slitiny se odměšují. Sklon k oxidaci se potlačuje přísadou 0,005 až 0,02 % berylia. Berylium však zvyšuje hrubozrnnost slitiny, proto zjemnění zrna dosáhneme přidáním 0,05 až 0,1 % titanu. Se stoupajícím obsahem hořčíku se slévateľnost zhoršuje a to i s přidavkem křemíku, který v tomto ohledu působí příznivě. Mezi další výhodné vlastnosti slitin tohoto typu patří dobrá třísková obrobiteľnost a leštiteľnost povrchu, který zvláště v případě anodické úpravy (eloxování) a barvení poskytuje atraktivní vzhled.

Slitiny se používají na dekorativní předměty, lodní kování, ozdobné díly aut. Dále v chemickém a potravinářském průmyslu a např. na optické přístroje.

Slitiny Al-Mg normované v ČSN EN 1706 se používají v tepelně nezpracovaném stavu.

## **5.3. Slitiny typu Al-Zn a Al-Zn-Mg**

Binární slitiny mají nepříznivé slévářenské (vysoká smršťivost) a mechanické vlastnosti. K zlepšení vlastností dochází přidáním některých vhodných přísad. Nejpoužívanější slitiny této skupiny jsou Al-Zn-Mg a Al-Zn-Si-Mg. Obsah zinku je v rozmezí 3 až 8 %, obsah hořčíku v rozmezí 1 až 3 %. Jako zjemňující přísada se používá titan a chrom. Výhodou obou těchto slitin je schopnost přirozeného stárnutí, kdy k vytvrzení dochází po 14 až 30 dnech. Proces vytvrzování je možno urychlit žíháním při zvýšené teplotě. Mezi další výhodné vlastnosti těchto slitiny patří rozměrová stabilita odlitků, dobrá třísková obrobiteľnost, dobrá korozní odolnost a dobré mechanické vlastnosti. Při celkovém obsahu legur vyšším než 8 % však dochází k značnému zhoršení odolnosti proti interkrystalické korozi.

## 5.4. Slitiny typu Al-Si-Cu

Jde o nepoužívanější typ slitin hliníku, který tvoří asi 1/2 celkové produkce hliníkových slitin a jeho použití je převážně v automobilovém průmyslu. Nejčastěji se používají slitiny podeutektické až eutektické, z nichž nejznámějším představitelem je slitina  $\text{AlSi8Cu3}$ . Díky obsahu mědi má tato slitina menší odolnost vůči korozi, ale její mechanické vlastnosti a obrobitelnost jsou dobré. Nevýhodou této slitiny je sklon k tvorbě trhlin a vzniku staženin, které je možné eliminovat vyšším obsahem křemíku. U těchto slitin zvýšený obsah křemíku také znamená lepší zabíhavost. Dále je možné vlastnosti zlepšovat očkovaním.

Slitiny tohoto typu se používají ve stavu tepelně nezpracovaném, neboť díky přítomnosti mědi dochází k určitému stupni samovolnému vytvrzování, které probíhá několik dnů. Tento efekt je tím silnější, čím byla rychlost ochlazování odlitku větší.

Lze je použít pro výrobu tvarově složitých odlitků litých do pískových forem, do kokil nebo pod tlakem. Nadeutektické slitiny se pak používají na výrobu pístů spalovacích motorů a bloků motorů. Tyto slitiny obsahují 14-17% křemíku, 4% mědi a 0,5% hořčíku příp. 2% niklu.

Přítomností mědi v těchto slitinách se snižuje stahování kovu při tuhnutí, zlepšuje se nepropustnost odlitků a také se uvádí její příznivý vliv k zmenšení naplynění taveniny. Dále přítomností mědi se zvyšuje pevnost a tvrdost, ale snižují se plastické vlastnosti. Ke snižování plastických vlastností dochází i s rostoucím obsahem hořčíku a zinku. Obrobitelnost slitin tohoto typu se zlepšuje s rostoucím obsahem mědi. Tímto ovšem klesá korozní odolnost. V tomto ohledu se projevuje negativní účinek mědi malou odolností vůči korozi těchto slitin v kyselinách, alkalických roztocích a mořské vodě. Při obsahu nad 2% mědi je korozní odolnost poměrně špatná a je doporučeno pro eliminaci porušování materiálu korozí používat ochranné prostředky jakými jsou např. nátěry. Pro použití v automobilovém průmyslu, který je největším odběratelem těchto slitin je však korozní odolnost ještě dostačující. Při obsahu mědi vyšším než 0,5% se zhoršuje možnost anodické oxidace, neboť se zmenšuje tloušťka s hutnost ochranné vrstvy.

## 6. Slitiny typu Al-Si

[1,2,3,5,6]

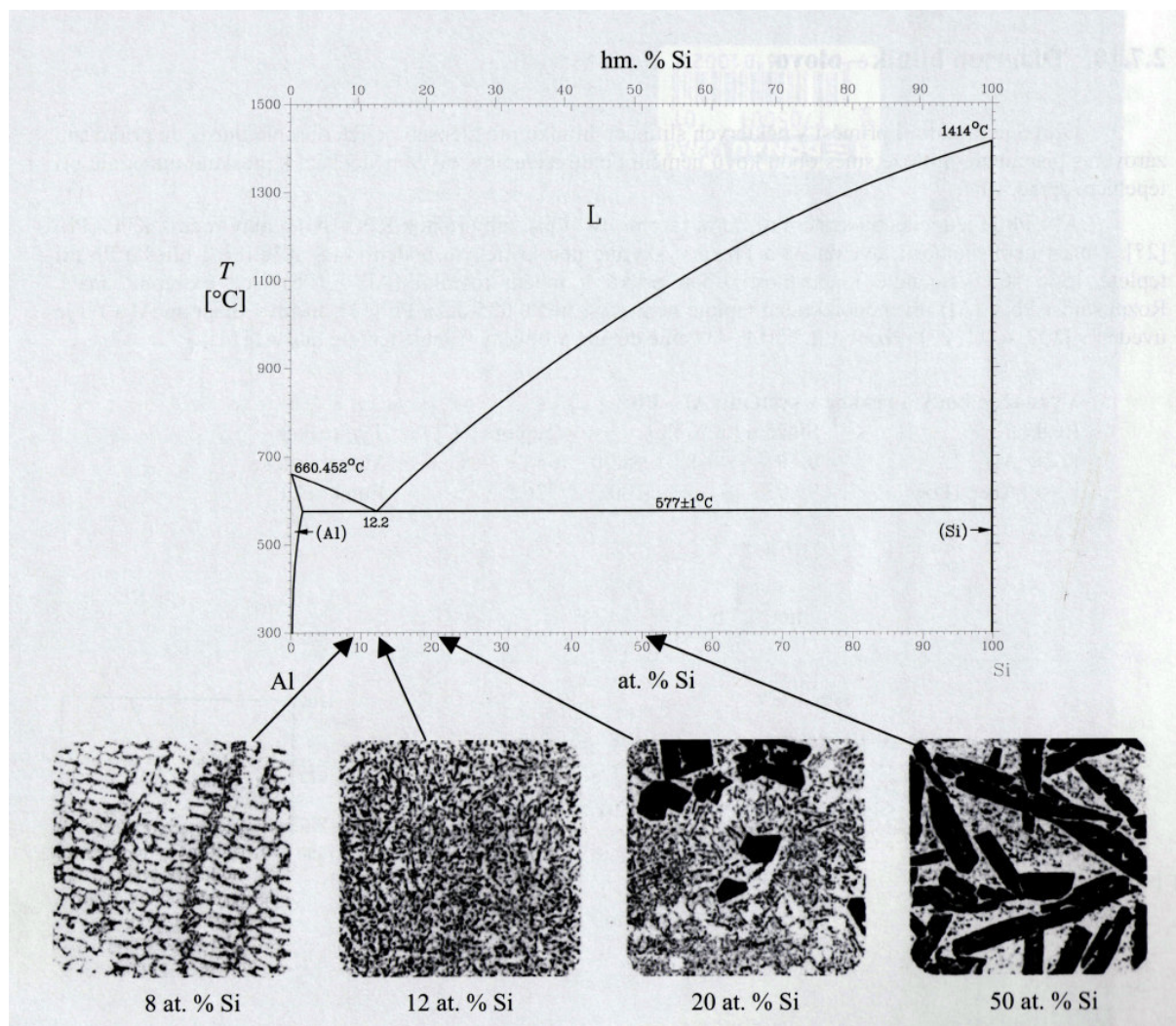
Slitiny tohoto typu se dělí do tří skupin [2]:

- podeutektické – 4,5 až 10% Si
- eutektické – 11 až 13% Si
- nadeutektické – nad 13% Si

Kromě základních prvků (hliník a křemík) ještě obsahují železo a mangan, jejichž obsah se pohybuje řádově v desetinách procenta. Mezi dalšími doprovodnými prvky se vyskytuje měď jejíž obsah, jsou-li požadavky na korozivzdornost, nebo použití v potravinářském průmyslu, nepřekročí 0,05%. Pro zjemnění zrna se používá titan v množství 0,1-0,2%.

Slitiny tohoto typu mají dobré slévárenské vlastnosti, odlitky mají dobrou těsnost vůči plynům i kapalinám. Dále se vyznačují dobrou svařitelností, odolností vůči korozi, ale horší obrobiteľností. S rostoucím obsahem křemíku se slévárenské vlastnosti zlepšují. Slitinami tohoto typu se vyrábějí odlitky lité do pískových nebo kovových forem a odlitky lité pod tlakem. Slitiny s obsahem křemíku do oblasti eutektika mají nižší interval tuhnutí, zlepšuje se zabíhavost a zmenšuje se objem staženin. Tato skutečnost je způsobena tím, že při tuhnutí křemík zvětšuje svůj objem a tím kompenzuje stahování hliníkové matrice.

Slitiny typu AlSi se vyznačují středními mechanickými vlastnostmi, které lze zvýšit přísadou prvků s vyšší rozpustností v tuhém roztoku (např. měď a hořčík). Modifikací slitiny je možno zvýšit tažnost a obrobiteľnost. Odolnost vůči korozi je průměrná, ve vlhké atmosféře dostává slitina šedé matné zabarvení. I přes to, že odlitky lze brousit a leštit se tyto slitiny pro dekorativní účely příliš nehodí. Tuto skutečnost nezlepší ani anodická oxidace, po jejíž aplikaci mají slitiny černo-šedé zabarvení. Slitiny je možno galvanicky pokovovat (chromováním, niklováním).



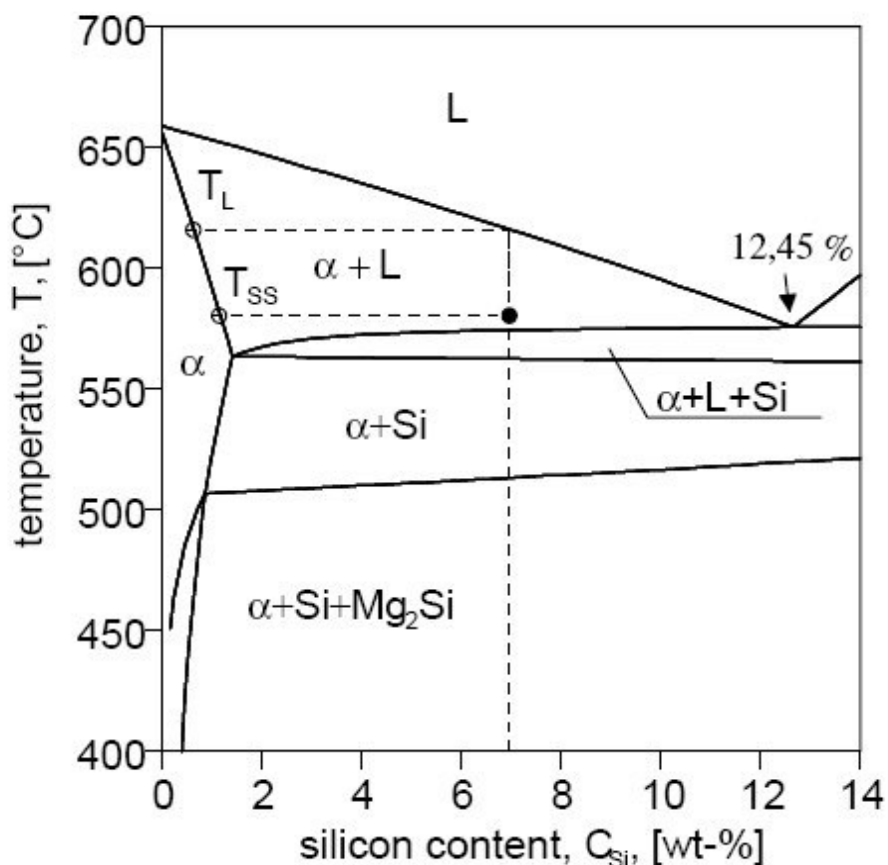
Fázový diagram systému Al – křemík a charakteristiky mikrostruktur slitin Al-Si s různým obsahem křemíku [6]

### 6.1. Slitiny typu Al-Si-Mg

Obsah křemíku se pohybuje v rozmezí 0,25-0,45% , u některých slitin až 0,7% a umožňuje vytvrzovat slitiny za tepla. Přítomností hořčíku se při běžné rychlosti ochlazování ve slitině vylučuje fáze  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Běžně se tyto slitiny vyznačují pouze průměrnými mechanickými vlastnostmi, které lze zvýšit vytvrzováním. Slitiny typu Al-Si-Mg jsou podeutektické a podle obsahu křemíku se dělí do dvou typů:

- 1)  $\text{AlSi7Mg}$
- 2)  $\text{AlSi10Mg}$

Slitiny AlSi10Mg mají oproti slitinám AlSi7Mg lepší slévárenské vlastnosti a obrobitelnost. Stejně tak jako u binárních slitin AlSi je i zde obsah doprovodných prvků limitován na velmi nízké hodnoty. Lze je odlévat do pískových forem, do kokil gravitačně i pod tlakem. Používají se pro vysoce namáhané výrobky, nejčastěji v leteckém a automobilovém průmyslu. Vytvrzováním lze zvýšit mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost. Ovšem na úkor tažnosti, která po vytvrzování klesá. Vlivem zvýšené tvrdosti se zlepšuje obrobitelnost.



Část pseudo binárního diagramu slitiny AlSiMg<sub>0,3</sub> [10]

### 6.1.1. Slitina AlSi10Mg (EN AC-43000)

Jedná se mírně podeutektickou slitinu s nízkým obsahem doprovodných prvků a nečistot. Má výborné slévárenské a technologické vlastnosti, velmi dobrou obrobitelnost a odolnost vůči korozi.

Jsou vhodné jak pro lití do pískových, tak do kokil. Slitinu litou do písku je nutné modifikovat sodíkem, u kovových forem je modifikace rovněž prospěšná.

Slitina se používá jak ve stavu bez tepelného zpracování, tak tepelně zpracovaná. Vytvrzování na stav T6 má tento postup:

- rozpouštěcí žíhání při 510 – 525 °C po dobu 3 až 6 hodin
- ochlazení ve vodě
- precipitační žíhání při teplotě 150 – 175 °C po dobu 5 až 15 hodin

Slitina se nejčastěji používá na tenkostěnné, tvarově složité odlitky, kde je požadavek na vysokou pevnost a houževnatost (vysoce namáhané strojní součástky, díly motorů, klikové skříňe, brzdové čelisti, rychloběžné součástky, ventilátory apod.).

#### Fyzikální vlastnosti:

Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	2,65
Rozsah teplot tuhnutí ( $^{\circ}\text{C}$ )	575 – 620
Elektrická vodivost ( $\text{m}\cdot\Omega^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	17 – 20
Tepelná vodivost ( $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	0,37
Lineární součinitel tepelné roztažnosti 20 až 100 °C	20

Fyzikální vlastnosti slitiny AlSi10Mg [3]



### Chemické složení:

Prvek	Obsah (%)
Si	9,0 – 11,0
Fe	0,55
Cu	0,05
Mn	0,45
Mg	0,20 – 0,45
Ni	0,05
Zn	0,10
Pb	0,05
Sn	0,05

Obsah nečistot (%)	
Jeden prvek	Celkem
0,05	0,15

Chemické složení slitiny AlSi10Mg dle ČSN EN 1706 [1]

### Mechanické vlastnosti:

Stav Slitiny		R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A <sub>50</sub> (%)	HBS
Kovová forma	L	180	90	2,5	55
	T6	260	220	1	90
	T64	240	200	2	80
Písková forma	L	150	80	2	50
	T6	220	180	1	75

Mechanické vlastnosti slitiny AlSi10Mg na odděleně litých zkušebních kusech [1]

Legenda:

L – v litém stavu, T6 – vytvrzování na optimální pevnost a tažnost, T64 – vytvrzeno na optimální tažnost, HBS – tvrdost dle Brinella zjištěná ocelovou kalenou kuličkou

## Technologické vlastnosti:

Základní technologické vlastnosti slitiny AlSi10Mg [2]

Vhodné pro výrobu odlitků litím	do pískových forem	3 – 4
	do kokily	3 – 4
	pod tlakem	0
Hlavní vlastnosti charakterizující slévateľnost slitiny	Zabíravost	4
	odolnost proti trhání za tepla	3 – 4
	těsnost stěn odlitku	3 – 4
	Smršťování	3 – 4
Opracovatelnost řeznými nástroji		1
Vhodné pro povrchovou úpravu	Mechanicky	1 – 2
	anodickou oxidací	0 – 1
Chemická odolnost	v normální atmosféře	3
	v přímořské atmosféře	2
Vhodné pro styk s potravinami		3
Mechanické vlastnosti při namáhání	Klidném	3
	proměnlivém	3
	Rázy	2
	za tepla (200 °C)	1
Použitelné do teplot °C		150
Vzhled povrchu po anodické oxidaci		šedý
Svařitelnost	Plynem	3
	elektrickým obloukem	4

Legenda:

0 – nevhodné

1 – špatné

2 – ucházející

3 – dobré

4 – velmi dobré

## 7. Plyny ve slitinách hliníku

[1,12]

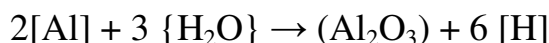
Jediným plynem, jehož rozpustnost v tekutém hliníku je technicky významná, je **vodík**. [1]

### 7.1. Zdroje vodíku

Nejčastějším zdrojem vodíku je vlhkost v pecní atmosféře, v solích, vyzdívce, špatně vysušené kelímky a vlhké nářadí.

Dojde-li ke styku roztaveného kovu s vodní párou, dochází k disociaci vody, kde kyslík reaguje s hliníkem. Při této reakci vzniká oxid hlinitý a vodík se v roztaveném kovu rozpouští.

Tato reakce je popsána následující rovnicí:



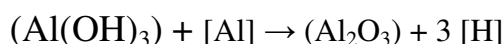
Jedním z hlavních nositelů vlhkosti jsou tablety, krycí a rafinační soli. Soli (tablety) je nutné skladovat v suchých a vytápěných místnostech. Obaly v nichž se nacházejí musí být uzavřeny, neboť často bývají hygroskopické a snadno tak absorbují vodu z okolního prostředí. Z tohoto důvodu by se měly před použitím vysušit nebo dát k pecím do předehřívачů.

Dalším zdrojem vodíku jsou např. nové tavící kelímky a nové vyzdívky. Tyto je potřeba před použitím velmi pečlivě vysušit a předehřát do červeného žáru. K novým kelímkům dodává výrobce tzv. vysoušecí diagramy, které určují způsob přípravy kelímku před jeho nasazením do výroby. Jsou zde určeny teploty, po které je nutné na daných teplotách a po danou dobu setrvat. Možným zdrojem můžou být též staré kelímky, které se několik dnů nepoužívaly a mohlo zde dojít k absorpci vzdušné vlhkosti. Před nasazením těchto kelímků do výrobního procesu je nutné je den předem předehřát. U přerušovaných provozů v době kdy se kelímky nepoužívají jsou tyto ponechávány při provozní teplotě asi 500°C. Používané kovové nářadí by mělo být opatřeno nátěry a pečlivě vysušeno. Licí nářadí je nutné neustále předehřívát na hořácích.

Je třeba ještě zmínit jako zdroj vodíku vsázku a to v případě, že se přidává do roztaveného kovu bez důkladného předehřátí, zde nestačí pouhé vysušení. Voda je totiž vázána v pórech na povrchu vsázkových surovin a rovněž v hydroxidech, které se tvoří na zoxidovaném

povrchu v podobě  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Z toho vyplývá nutnost skladovat hliníkové housky v prostorech s minimální vlhkostí. V tomto ohledu hraje též roli dodavatel materiálu, neboť každý dodává materiál s různým stupněm vlhkosti obsažené v materiálu.

Odtud se uvolňuje vodík dle následující reakce:



V tomto případě reaguje vodní pára s kovovým hliníkem, nikoliv s oxidy. Do teploty asi 900 °C neporušená vrstva oxidů poměrně dobře chrání taveninu před dalším naplyněním. Po překročení této teploty se však rychlost naplynění prudce zvyšuje.

Jako zdroj vodíku u přímého ohřevu mohou sloužit též uhlovodíky a vodní pára ze spalných plynů v tavicích nebo udržovacích pecích, nebo ze znečištěné či zamaštěné vsázky apod.

Veličina charakterizující maximální množství vodíku, které se může za rovnovážných podmínek rozpustit v kovu určitého chemického složení je označována jako **rozpustnost vodíku**. Mohou zde nastat dva případy:

1) *množství rozpuštěného vodíku je menší než rozpustnost za dané situace:*

K tomuto případu dochází např. při tavení, kde je omezený přístup vlhkosti, nebo odplyněná tavenina.

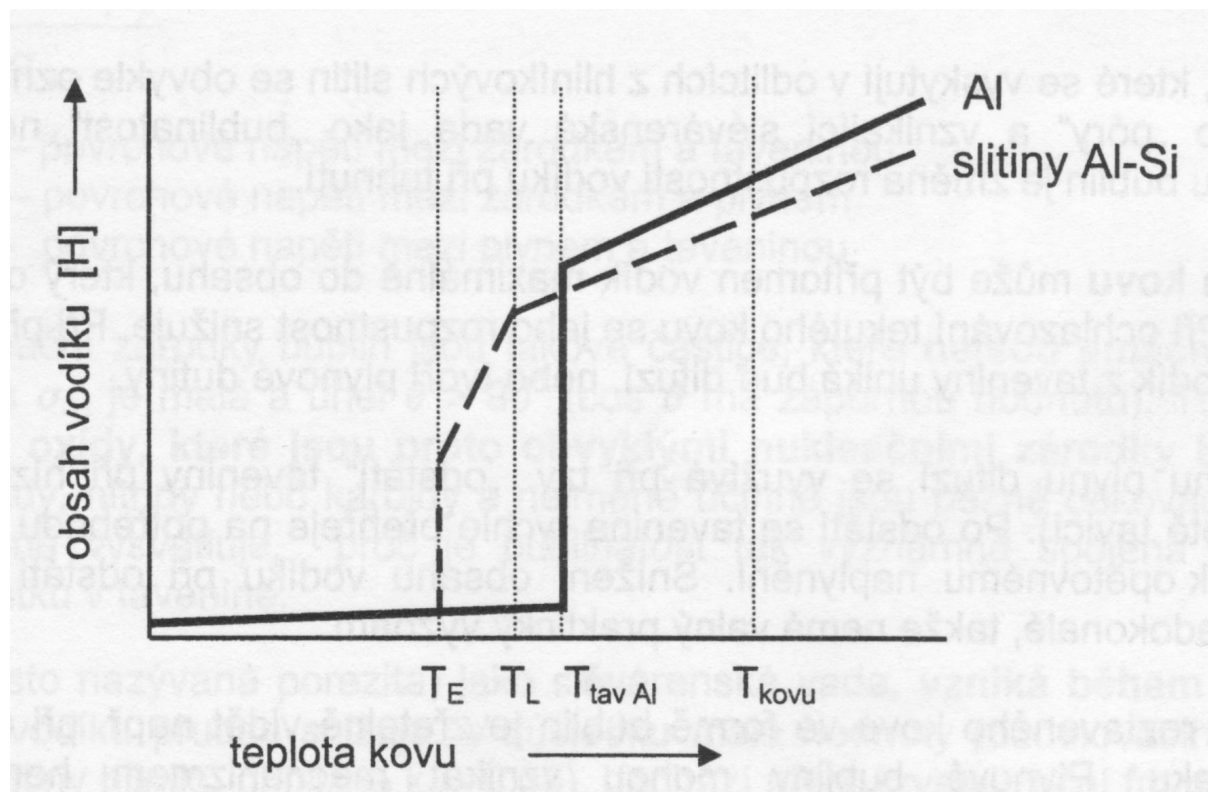
2) *množství rozpuštěného vodíku je větší než rozpustnost za dané situace:*

K tomuto dochází při nerovnovážných podmínkách jakými může být např. rychlé ochlazování, kdy je v kovu rozpuštěno větší množství vodíku než odpovídá rozpustnosti za dané situace (tento stav se označuje jako přesycený tuhý roztok).

Maximální obsah vodíku, který může být přítomen v roztaveném hliníku je dán křivkou rozpustnosti. S klesající teplotou se toto maximum snižuje. Je-li v tavenině přítomno větší množství vodíku než udává křivka, dochází při překročení meze rozpustnosti k úniku přebytečného vodíku z taveniny difúzí nebo k tvorbě plynových bublin.

Snížení rozpustnosti vodíku během tuhnutí je hlavní příčinou vzniku plynových dutin ve slitinách hliníku. [1]

Rozpustnost vodíku v závislosti na teplotě zobrazuje následující obrázek:



Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a slitinách Al-Si [1]

Z grafu je patrné, že rozpustnost vodíku u slitin má stejný charakteristický průběh jako tomu je u čistého hliníku. Rozpustnost se mění v celém intervalu teplot krystalizace, tj. mezi teplotami likvidu a solidu, resp. eutektickou teplotou. Kromě teploty je rozpustnost ovlivněna též přítomností některých slitinových prvků. Prvky, které ji snižují jsou např. křemík, zinek, měď a mangan. Naproti tomu přítomností hořčíku, sodíku, vápníku, lithia a titanu se rozpustnost zvyšuje.

## 7.2. Mechanismy vzniku plynových dutin v odlitcích

Termínem „bubliny“ nebo „póry“ jsou u slitin hliníku označovány drobné dutiny a tato vada se označuje jako „bublinatost“ nebo „porezita“. Příčinou těchto vad, jak již bylo výše uvedeno, je změna rozpustnosti vodíku během tuhnutí.

Bublíny mohou v tavenině vznikat dvěma mechanismy:

- homogenní nukleací
- heterogenní nukleací

### **Homogenní nukleace**

Podmínkou vzniku bublin vyjadřuje následující vztah:

$$p_{H_2} > p_{atm} + p_{met} + p_{\sigma}$$

$p_{H_2}$  – tlak v bublině

$p_{atm}$  – atmosférický tlak

$p_{met}$  – metalostatický tlak

$p_{\sigma}$  – tlak vyvolaný povrchovým napětím

Předpokládá se, že hodnota tlaku, který je ve skutečnosti nutný pro homogenní nukleaci bublin je řádově 3000 až 5000 MPa. Z tohoto důvodu je vznik bublin mechanismem homogenní nukleace nepravděpodobný a v reálných podmínkách se bubliny tvoří pouze mechanismem heterogenní nukleace. [1]

### **Heterogenní nukleace**

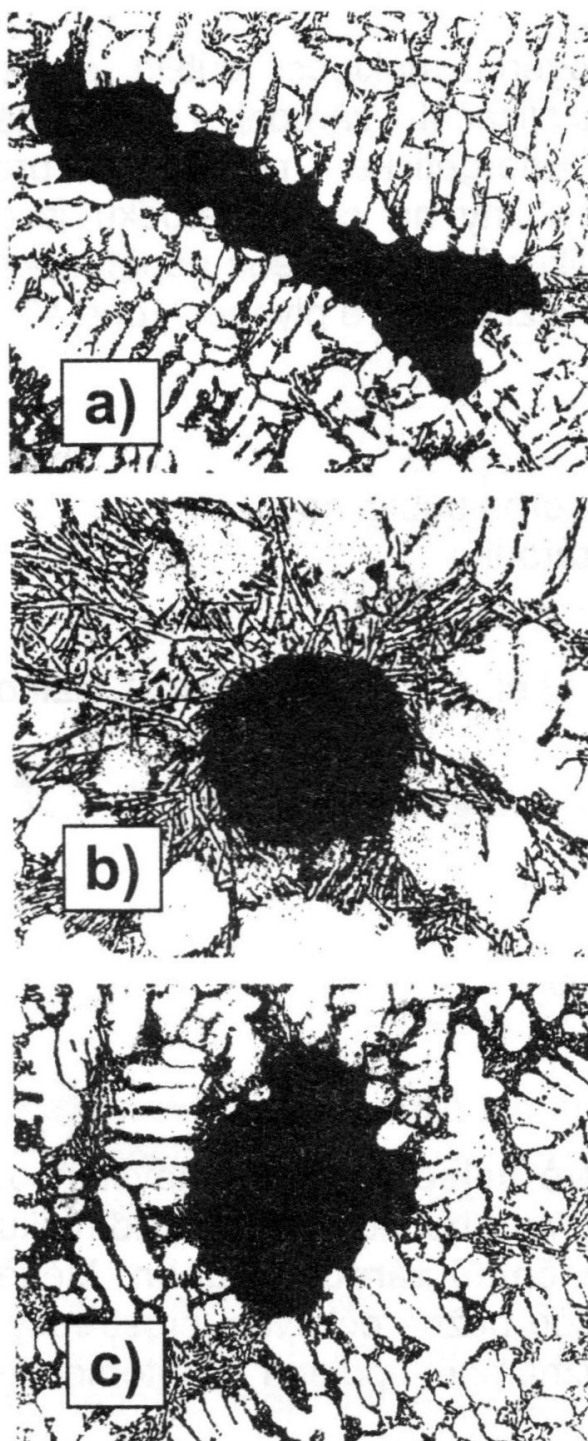
U tohoto mechanismu slouží jako krystalizační zárodky cizí tuhé částice. Pro nukleaci bubliny na cizím zárodce je rozhodující povrchové napětí mezi taveninou, cizí částicí a plynem.

Jako vhodné nukleační zárodky bublin jsou vhodné částice, které nejsou smáčivé taveninou. Takovéto podmínky nejlépe splňují oxidy, jež jsou nejčastějšími nukleačními zárodky bublin. Dále se podílí na tvorbě bublin boridy, nitridy nebo karbidy a nejméně účinné jsou očkovací prostředky. Tato skutečnost dokládá proč je bublinatost významně spojena s přítomností oxidických vměstků.

## **7.3. Porezita v odlitcích**

Vada u odlitků označovaná jako porezita bývá způsobena kombinací tvorby tzv. mikrostaženin a bublin. Případ kdy je porezita tvořena čistě bublinami nebo mikrostaženinami se vyskytuje velmi zřídka. Převažuje-li mechanismus vzniku bublin, vykazují póry více kulovitý tvar. Při mechanismu mikrostaženin jsou dutiny tvarově členité a kopírují dendritickou stavbu kovu.

Tuto skutečnost ukazuje následující obrázek:



Tvar pórů ve slitinách Al:

- a) mikrostaženina
- b) plynová bublina
- c) porezita (plyn a mikrostaženina)

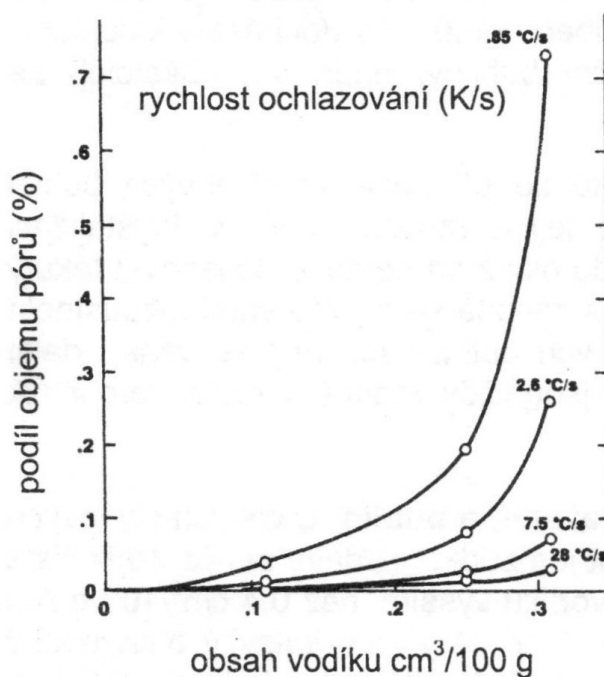
[1]

Typickým místem výskytu pórů jsou mezidendritické prostory, kde dochází k tuhnutí a jejich tvar a poloha je ovlivněna morfologií tuhé fáze, obsahem plynů a rychlostí tuhnutí. Vada označovaná jako porezita se vyskytuje převážně u slitin se širokým intervalem tuhnutí.

Při vysokém obsahu plynů v tavenině se tvoří převážně dutiny kulovitěho tvaru a to již při nízkém podílu ztuhlé fáze. Při pomalém tuhnutí difunduje vodík do bublin na poměrně velké vzdálenosti a tím vznikají velké bubliny, jež nemají téměř žádnou vazbu na krystalickou strukturu kovu.

Při rychlém postupu krystalizační fronty se bubliny brzy obalí vrstvou tuhé kovu, aniž by difúzí vodíku mohlo dojít k jejich dalšímu růstu. Výsledkem tohoto děje je pak výskyt malých kulovitých nebo protáhlých bublin, uzavřených v mezidendritických prostorách kovu, označovaných jako mikrostaženiny. Vznik mikrostaženin se více uplatňuje tím více, čím je širší dvoufázové pásmo.

V běžných podmínkách při tuhnutí nedochází k snížení obsahu vodíku na rovnovážnou hodnotu a část zůstává v kovu v podobě přesyceného tuhého roztoku. S rostoucí rychlostí ochlazování roste přesycení tuhé kovu a tím dochází k vyloučení menšího množství plynného vodíku a tím k menší pórovitosti. Z toho vyplývá, že k vzniku plynových dutin jsou více náchylné silnostěnné odlitky, lité do pískových forem, než odlitky tenkostěnné a odlitky lité do kovových forem.



Vliv obsahu vodíku a rychlosti ochlazování na objem pórů [1]



Rovněž je třeba ještě zmínit vliv očkovaní a modifikace na rozložení pórů. Neočkované a nemodifikované slitiny mívají spíše sklon k vzniku soustředěných, velkých dutin. Zatímco očkovaní a modifikace zvětšuje sklon ke vzniku rozptýlených mikrostaženin.

Přítomností porezity dochází k ovlivnění řady vlastností hliníkových odlitků:

- snižuje se pevnost a tažnost, póry jsou iniciačními místy pro vznik únavových lomů
- u odlitků s požadavkem na těsnost, může dojít vlivem porezity k pronikání tlakového média
- snížená kvalita obrobených ploch
- obtížnější povrchová úprava odlitků

## **7.4. Odplyňování hliníkových slitin**

Cílem je snížení obsahu vodíku. Na odplyňování slitin hliníku se používají dva způsoby:

- vakuování taveniny
- probublávání taveniny aktivními nebo neaktivními (inertními) plyny

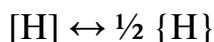
### **Odplyňování vakuováním**

Princip této metody spočívá ve snížení tlaku atmosféry nad hladinou roztaveného kovu. Po dosažení požadované teploty kovu se pánve s kovem zaveze do vakuovacího zařízení, uzavře zvonem a tlak ve vakuovací komoře se sníží asi na 5 kPa. Odplyňovací proces pak trvá několik minut. Rychlost a intenzitu procesu lze zvýšit dmýcháním inertního plynu do taveniny. V tomto případě může vodík difundovat do bublin inertního plynu. Tato metoda je energeticky méně náročná a rychlejší. Dosahované hodnoty jsou dokonce lepší než u prostého odplyňování vakuováním.

### **Odplyňování probubláváním aktivními nebo inertními plyny**

Princip této metody spočívá v difúzi vodíku do bublin plynu pomocí něhož je vynášen na hladinu. Podle reakce mezi vodíkem a bublinami se dělí používané plyny na aktivní a inertní. Jako inertní plyn se používá argon nebo dusík. Plyn je vháněn do taveniny, nebo se uvolňuje z odplyňovacích tablet, v blízkosti dna pánve tak, aby se tvořily co nejmenší bubliny.

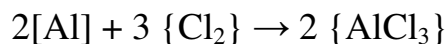
Do bublin difunduje vodík podle vztahu:



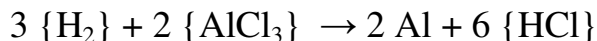
Základní podmínkou úspěchu této metody je malá velikost bublin, dostatečně dlouhá dráha (proto je důležité aby byl inertní plyn vháněn u dna dostatečně vysoké pánve), dobré promíchávání (homogenizace) taveniny a aby plyn neobsahoval žádnou vlhkost. Z tohoto důvodu je nutné používat pouze plyny vysoké čistoty.

Za aktivní plyny se označují takové, které vytvářejí s vodíkem chemické sloučeniny. Pro tuto metodu se používá chlór nebo fluor.

Chlor reaguje s roztaveným hliníkem dle rovnice:



Chlorid hlinitý se v tavenině nachází v plynné formě. Reaguje s vodíkem dle reakce:



Při průchodu chloridu hlinitého taveninou dochází k reakci i s dalšími prvky, které mají vyšší afinitu k chlóru než hliník. Tímto také dochází k rušení modifikačního účinku sodíku a stroncia, může dojít i k podstatnému snížení obsahu hořčíku. Proto je nutné provádět modifikaci až po odplynění. Dalším důvodem proč se modifikuje až po odplynění je i negativní vliv těchto prvků na proces odplynění. Např. přítomností stroncia se vytváří na povrchu vrstva  $SrCl_2$ , která brání přestupu vodíku z taveniny do bubliny a k odplynění dochází až po zreagování stroncia.

Intenzita procesu odplynování je vyšší při použití aktivních plynů než u inertních (neutrálních). Používání chlóru je však v poslední době omezován ekologickými předpisy pro jeho jedovatost, korozivnímu působení a rozrušování ozónové vrstvy. V současné době je tendence používání chlóru nahradit inertními plyny. Je-li přeci jen chlór používán, děje se tak pouze v takových koncentracích, aby v tavenině zcela zreagoval na chemické sloučeniny.

Ne jinak je na tom i používání fluoridových prostředků (a to jak v plynné formě nebo ve formě solí), jejichž používání je vzhledem k jejich toxicitě a agresivitě ve většině zemí zakázáno.

## 7.5. Způsoby odplyňování aktivními a neutrálními plyny

Do taveniny se aktivní nebo neutrální (inertní) plyny dostávají:

- rozkladem odplyňovacích solí, tablet
- v plynné formě

### Odplyňovací soli

Vlivem vysoké teploty taveniny se rozkládají za vzniku plynného dusíku, příp. chlóru nebo fluoru. Často se takto používá hexachlorethan  $C_2Cl_6$  a to buď ve formě prášku, granulátu nebo tablet, které se ponoří ke dnu tavícího kelímku pomocí ponorného zvonu, nebo se do taveniny dmýchají tryskou dusíkem nebo argonem.

### Aplikace v plynné formě

Základní předpoklad pro dobrou účinnost metody je co nejmenší velikost bublin. Plyn je vháněn do taveniny pomocí trubic, porézních tvárnic nebo pomocí rotačních impellerů.

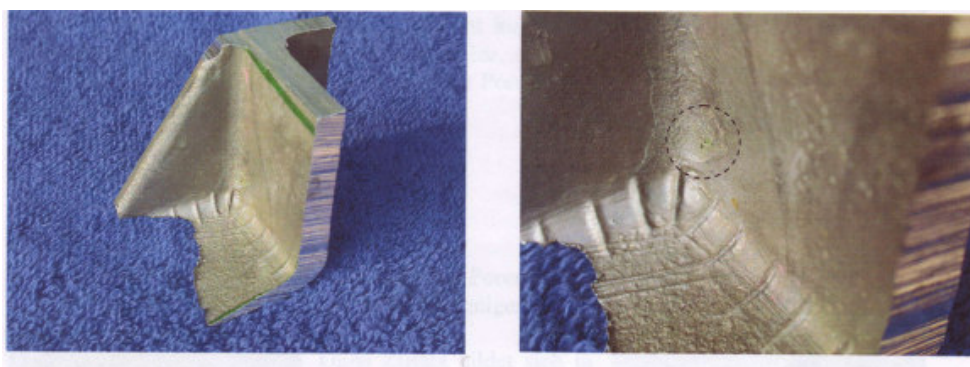
- *odplyňovací trubice*: grafitová, keramická trubka opatřená porézní zátkou vyrobené z porézní keramiky nebo porézního grafitu
- *porézní tvárnice*: většinou jsou zabudovány do vyzdívky ve dně tavící nebo speciální odplyňovací pánve

(Umístění trubic nebo tvárnic musí být takové, aby současně s aplikací docházelo k míchání lázně.)

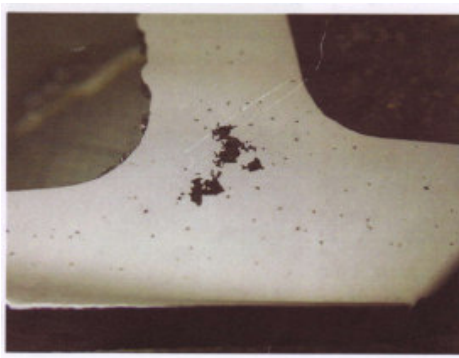
- *rotorová zařízení*: jsou buď stabilní nebo mobilní v nichž se nosný plyn vhání do taveniny grafitovým rotorem. Často používané je zařízení firmy Foseco označované jako FDU (Foundry Degassing Unit), nebo firmy StrikoWestofen zařízení DC 2 a další. Plyn je vháněn osou rotoru z tlakové bomby. Nejčastěji se takto používá plyn dusík, méně často argon.

## 7.6. Naplyňování taveniny

V předchozí kapitole bylo zmíněno odplyňování taveniny. V některých případech je naopak žádoucí taveninu naplynit, abychom odstranily nežádoucí a získali určité požadované vlastnosti odlitku. Tato metoda úpravy taveniny se používá u tvarově složitějších odlitků skládajících se z různých tloušťek stěn. Jak již bylo řečeno dříve na tvorbě plynových dutin se podílí, kromě jiných ukazatelů, též tloušťka odlitku, kde náchylnější na vady jsou zejména tlusté stěny odlitku, příp. tomu může být i v místech kde dochází k hromadění materiálu, jak ukazuje následující obrázek.



V těchto místech se pak často vytváří tzv. porezita (dutiny, mikrostaženiny), která je příčinou zhoršených vlastností a takový odlitek je pak označen jako vadný a nepoužitelný.



Účelem naplyňování taveniny je v podstatě přeměna dutin na mikropóry. Tyto mikropóry se vytvářejí za pomoci přítomnosti oxidů obsažených v hliníku a jejich velikost je dána rychlostí ochlazování. Naplyněním taveniny vhodnými prostředky (nejčastěji naplyňovací tablety) tedy dochází k eliminaci vzniku místně soustředěných bublin a mikrostaženin na úkor přítomnosti rovnoměrně v celém průřezu rozložených mikropórů.

# PRAKTICKÁ ČÁST

## 8. Cíle práce

Cílem práce je určit vliv odplynění resp. naplynění slitiny AlSi10Mg (EN AC 43000; dřívější označení ČSN 42 4331) na mechanické vlastnosti při gravitačním lítí do kovové formy.

a to u čtyř druhů ošetření taveniny bez jakéhokoliv dalšího tepelného zpracování.

U každého druhu ošetření taveniny byla provedena následující měření:

- spektrální analýza vzorků
- určení indexu hustoty charakterizujícího naplynění metodou dvojího vážení
- měření tvrdosti dle Brinella
- měření mechanických vlastností statickou zkouškou tahem ( $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A$ )

Následující tabulka popisuje jednotlivé druhy ošetření taveniny:

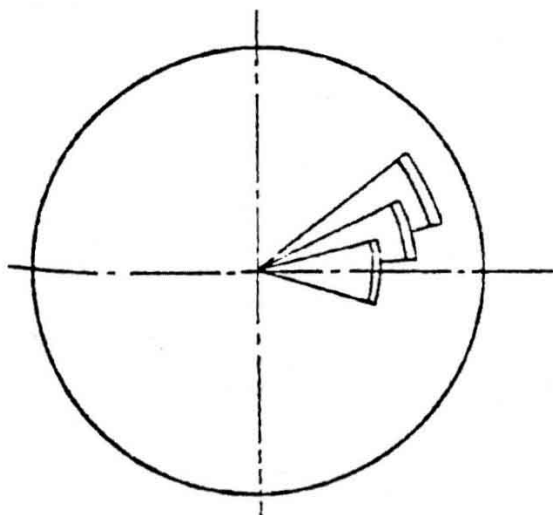
Číslo vzorku	Ošetření taveniny
1	tavenina neošetřena
2	tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97
3	tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík) + 2 modifikační tablety SIMODAL 97
4	tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety SIMODAL 97

### Tablety SIMODAL 97

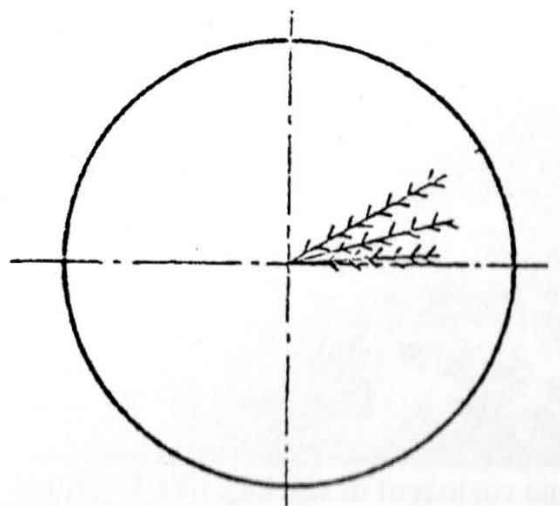
Používají se pro slitiny AlSi s obsahem křemíku od 5 do 13%. Jde o modifikační tablety, které při exotermické reakci uvolňují sodík.

Modifikace je proces, který ovlivňuje způsob růstu krystalizačních zárodků a mění morfologii vyloučených fází. Existuje obecný názor většiny autorů, kteří se shodují v tvrzení, že eutektický křemík se v nemodifikovaném eutektiku vylučuje ve tvaru hexagonálních desek (v rovině výbrusu jehlice s ostrým zakončením). Tento tvar eutektického křemíku u slitin Al-Si výrazně snižuje mechanické vlastnosti siluminů. Modifikací dochází k výrazné změně

struktury a vyloučení eutektického křemíku ve formě tyčinek až vláken, které se v rovině metalografického výbrusu jeví jako oblá zrna. [6]



a) nemodifikovaný eutektický křemík



b) modifikovaný eutektický křemík

Schematické znázornění růstového modelu eutektického křemíku [6]

### Tablety HYDRAL 40

HYDRAL 40 je naplyňovací činidlo pro hliník a všechny hliníkové slitiny. Účinek jeho spočívá v uvolňování určitého obsahu vodíku z taveniny, který se znovu vylučuje ve formě plynu během tuhnutí kovu – jeho vlastní tlak kompenzuje úbytek tuhnoucího kovu.

## 8.1. Spektrální analýza

Měření byla provedena ve firmě Unitherm na zařízení SPECTROCAST. Následující obrázky ukazují jeden z použitých vzorků. Na spodním obrázku jsou vidět místa, kde byla analýza provedena.



U každého odlitého vzorku byla provedena tři měření a následně vyhodnocena průměrná hodnota obsahu daného prvku.

**Vzorek č. 1:** tavenina neošetřena

Prvek	Č. měření - obsah prvku (%)			Průměrný obsah prvku (%)
	1	2	3	
<b>Si</b>	10,69	10,71	10,72	<b>10,71</b>
<b>Fe</b>	0,322	0,320	0,331	<b>0,324</b>
<b>Cu</b>	0,052	0,050	0,051	<b>0,051</b>
<b>Mn</b>	0,12	0,11	0,12	<b>0,12</b>
<b>Mg</b>	0,35	0,35	0,36	<b>0,35</b>
<b>Zn</b>	0,063	0,063	0,065	<b>0,064</b>
<b>Ni</b>	0,01	0,01	0,01	<b>0,01</b>
<b>Cr</b>	0,004	0,004	0,004	<b>0,004</b>
<b>Pb</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,002</b>
<b>Sn</b>	0,002	0,002	0,003	<b>&lt; 0,005</b>
<b>Ti</b>	0,026	0,026	0,030	<b>0,027</b>
<b>Ca</b>	0,0017	0,0029	0,0026	<b>0,0024</b>
<b>Na</b>	0,0001	0,0005	0,0003	<b>&lt; 0,0005</b>
<b>Sr</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Zr</b>	0,000	< 0,000	0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Al</b>	88,37	88,35	88,31	<b>88,34</b>

Poznámka:

Označení „< 0,000 “ znamená, že obsah daného prvku byl pod měřitelnou prahovou hodnotou danou nastavením na přístroji a danou softwarem

Označení např. „< 0,002 “ značí, že průměr obsahu prvku ze všech měření je nižší než prahová hodnota (v tomto případě 0,002 %)



**Vzorek č. 2:** tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97

Prvek	Č. měření - obsah prvku (%)			Průměrný obsah prvku (%)
	1	2	3	
<b>Si</b>	10,93	10,93	11,03	<b>10,97</b>
<b>Fe</b>	0,329	0,322	0,328	<b>0,326</b>
<b>Cu</b>	0,059	0,057	0,060	<b>0,058</b>
<b>Mn</b>	0,12	0,12	0,12	<b>0,12</b>
<b>Mg</b>	0,33	0,31	0,33	<b>0,32</b>
<b>Zn</b>	0,042	0,039	0,038	<b>0,040</b>
<b>Ni</b>	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
<b>Cr</b>	0,003	0,002	0,002	<b>0,002</b>
<b>Pb</b>	0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,002</b>
<b>Sn</b>	0,004	0,002	0,002	<b>&lt; 0,005</b>
<b>Ti</b>	0,022	0,020	0,020	<b>0,021</b>
<b>Ca</b>	0,0026	0,0034	0,0044	<b>0,0035</b>
<b>Na</b>	0,0065	0,0059	0,0067	<b>0,0064</b>
<b>Sr</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Zr</b>	0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Al</b>	88,15	88,18	88,06	<b>88,13</b>

**Vzorek č. 3:** tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík) + 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Prvek	Č. měření - obsah prvku (%)			Průměrný obsah prvku (%)
	1	2	3	
<b>Si</b>	10,90	10,82	10,79	<b>10,83</b>
<b>Fe</b>	0,330	0,324	0,321	<b>0,326</b>
<b>Cu</b>	0,053	0,053	0,050	<b>0,052</b>
<b>Mn</b>	0,12	0,12	0,12	<b>0,12</b>
<b>Mg</b>	0,40	0,40	0,40	<b>0,40</b>
<b>Zn</b>	0,093	0,092	0,093	<b>0,093</b>
<b>Ni</b>	0,01	0,01	0,01	<b>0,01</b>
<b>Cr</b>	0,006	0,006	0,006	<b>0,006</b>
<b>Pb</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,002</b>
<b>Sn</b>	0,003	0,003	0,003	<b>&lt; 0,005</b>
<b>Ti</b>	0,029	0,029	0,028	<b>0,029</b>
<b>Ca</b>	0,0028	0,0027	0,0029	<b>0,0028</b>
<b>Na</b>	0,0038	0,0026	0,0024	<b>0,0029</b>
<b>Sr</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Zr</b>	0,000	0,000	0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Al</b>	88,04	88,14	88,17	<b>88,12</b>

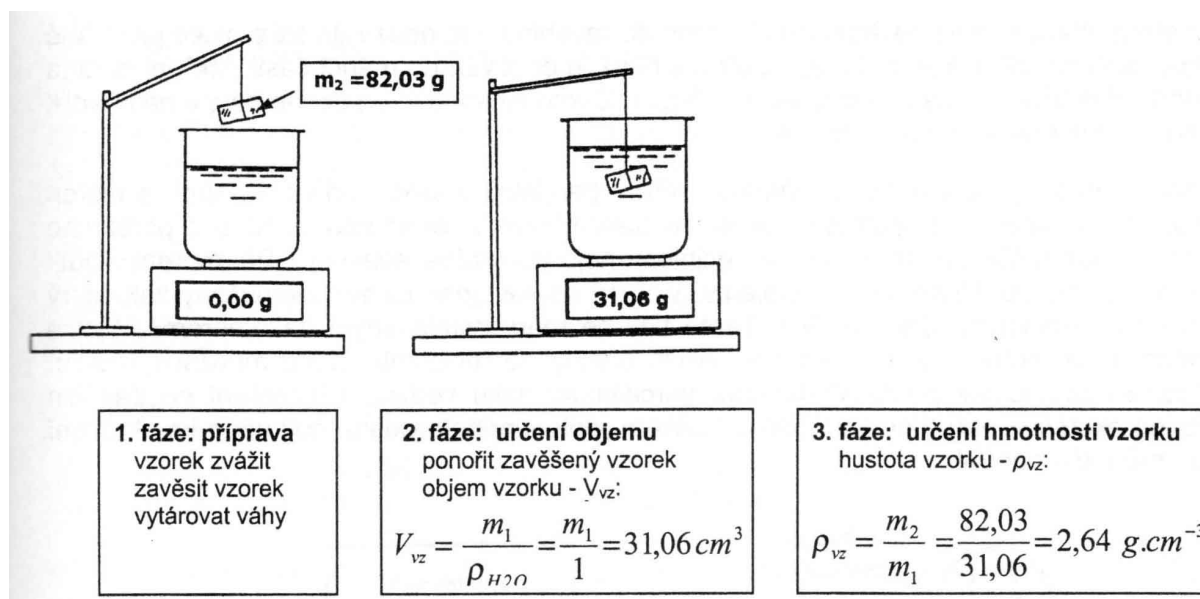
**Vzorek č. 4:** tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Prvek	Č. měření - obsah prvku (%)			Průměrný obsah prvku (%)
	1	2	3	
<b>Si</b>	10,85	11,05	10,66	<b>10,85</b>
<b>Fe</b>	0,320	0,327	0,318	<b>0,322</b>
<b>Cu</b>	0,056	0,059	0,057	<b>0,057</b>
<b>Mn</b>	0,11	0,11	0,11	<b>0,11</b>
<b>Mg</b>	0,29	0,30	0,30	<b>0,30</b>
<b>Zn</b>	0,039	0,04	0,038	<b>0,039</b>
<b>Ni</b>	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
<b>Cr</b>	0,003	0,003	0,002	<b>0,003</b>
<b>Pb</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,002</b>
<b>Sn</b>	0,002	0,002	0,001	<b>&lt; 0,005</b>
<b>Ti</b>	0,04	0,042	0,041	<b>0,041</b>
<b>Ca</b>	0,0025	0,0025	0,0027	<b>0,0026</b>
<b>Na</b>	0,0046	0,0045	0,0046	<b>0,0046</b>
<b>Sr</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Zr</b>	< 0,000	< 0,000	< 0,000	<b>&lt; 0,001</b>
<b>Al</b>	88,28	88,06	88,46	<b>88,26</b>

## 8.2. Naplynění vzorků

Aby bylo možné nějakým způsobem přiblížit jak mnoho použité druhy ošetření taveninu naplyňují nebo odplyňují, provedl jsem stanovení tzv. indexu hustoty označovaného jako **index DI** (z německého „Dichte index“), který se určuje tzv. **metodou dvojího vážení**. Metoda je jednoduchá, rychlá, přesná a nejčastěji ve slévárenských provozech využívaná. Základní myšlenka metody je podpořena Sievertsovým zákonem, podle nějž je za podtlaku v kovu nižší rozpustnost vodíku a proto se při tuhnutí vyloučí více vodíkových bublin, než při tlaku atmosférickém. Bubliny tak zůstávají uzavřeny v materiálu a tím snižují jeho hustotu. Cílem metody je určit hustotu vzorku, který se nechá ztuhnout při tlaku asi 8 kPa a porovnat ji s hustotou vzorku ztuhlého při tlaku atmosférickém. Metoda využívá pro stanovení hustoty Archimédova zákona. [1]

Následující ilustrační příklad na obrázku ukazuje metodu určení hustoty vzorku využitím Archimédova zákona:



Postup měření při metodě dvojího vážení [1]

Z naměřených hustot jsem poté stanovil index hustoty DI podle vztahu:

$$DI = \frac{\rho_{vzatm} - \rho_{vzvak}}{\rho_{vzatm}} * 100 \quad (\%)$$

$\rho_{vzatm}$  – hustota vzorku ztuhlého při normálním tlaku

$\rho_{vzvak}$  – hustota vzorku ztuhlého ve vakuu při podtlaku 8 kPa

Výsledná hodnota určuje naplynění vzorku. Čím vyšší číslo, tím je vzorek více naplyněn.

Následující obrázek ukazuje zařízení v němž tuhly vzorky při podtlaku.



Přístroj v němž tuhne zkušební vzorek za podtlaku

Metodou dvojího vážení jsem naměřil a vypočítal následující hodnoty indexu hustoty pro jednotlivé druhy ošetření taveniny:

Číslo vzorku	1	2	3	4
Index hustoty – DI (%)	<b>2,94</b>	<b>3,15</b>	<b>1,23</b>	<b>4,20</b>

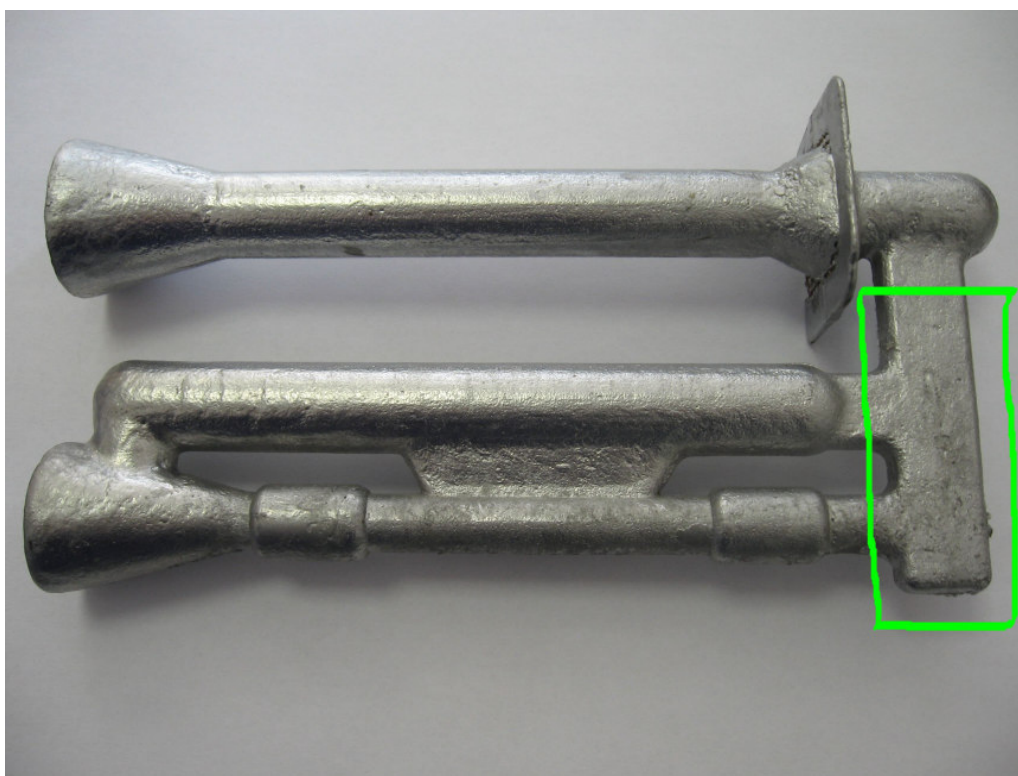
Legenda:

- 1 – tavenina neošetřena
- 2 – tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97
- 3 – tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík)  
+ 2 modifikační tablety SIMODAL 97
- 4 – tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40  
+ 2 modifikační tablety SIMODAL 97

### 8.3. Měření tvrdosti

Měření bylo provedeno metodou dle Brinella. Byla použita kulička z tvrdokovu o průměru 2,5 mm a zatížení 62,5 kp. Jako vzorky nemohly být použity odlité trhací tyčky kvůli svému nevhodnému tvaru. Z tohoto důvodu jsem za daných podmínek použil část odříznuté vtokové soustavy, která svým tvarem plně postačila na měření (na obrázku vyznačeno zeleně).

Poznámka: Jsem si vědom toho, že vzorky na měření tvrdosti nejsou odebrány z příliš reprezentativního místa. V tomto místě je větší pravděpodobnost výskytu oxidických plen a nečistot. Vznik těchto nečistot je však omezen použitím sítka (Asti sítko), které zabrání vniku nečistot a usměrňuje proudění taveniny v kokile. Pro běžné praktické použití ale naměřené výsledky velice blízko odpovídají skutečnosti.



Z každého druhu ošetření taveniny bylo odlito 5 ks vzorků (trhacích tyček). U každého vzorku jsem provedl 3 vpichy. Tímto jsem získal celkem 15 hodnot u každého ošetření taveniny. Z těchto hodnot jsem poté vypočítal aritmetický průměr. Výsledky naměřených hodnot ukazují následující tabulky.

**Vzorek č. 1:** tavenina neošetřena

Č. Vzorku	Č. měření - tvrdost (HBW)			Průměrná tvrdost (HBW)	Směrodatná odchylka
	1	2	3		
1	71,7	75,5	73,2	<b>74,1</b>	1,52
2	73,9	76,3	74,7		
3	74,7	74,7	74,7		
4	70,2	74,3	73,9		
5	73,2	75,9	74,7		

**Vzorek č. 2:** tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97

Č. Vzorku	Č. měření - tvrdost (HBW)			Průměrná tvrdost (HBW)	Směrodatná odchylka
	1	2	3		
1	77,9	84,9	81,3	<b>80,8</b>	1,83
2	77,9	79,5	83,0		
3	82,1	81,3	79,5		
4	79,5	81,3	81,7		
5	80,8	82,1	79,5		

**Vzorek č. 3:** tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík) + 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Č. Vzorku	Č. měření - tvrdost (HBW)			Průměrná tvrdost (HBW)	Směrodatná odchylka
	1	2	3		
1	76,3	74,7	77,9	<b>78,2</b>	3,25
2	84,9	76,3	77,1		
3	76,3	78,3	79,5		
4	77,9	75,9	84,9		
5	73,2	78,3	81,7		

**Vzorek č. 4:** tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Č. Vzorku	Č. měření - tvrdost (HBW)			Průměrná tvrdost (HBW)	Směrodatná odchylka
	1	2	3		
1	68,8	71,7	73,2	<b>72,1</b>	3,57
2	71,7	71,7	73,2		
3	74,7	68,8	77,9		
4	67,5	67,5	67,5		
5	74,7	73,2	79,5		

Následující tabulka ukazuje shrnutí průměrných hodnot tvrdosti dle Brinella (HBW) v závislosti na naplynění taveniny:

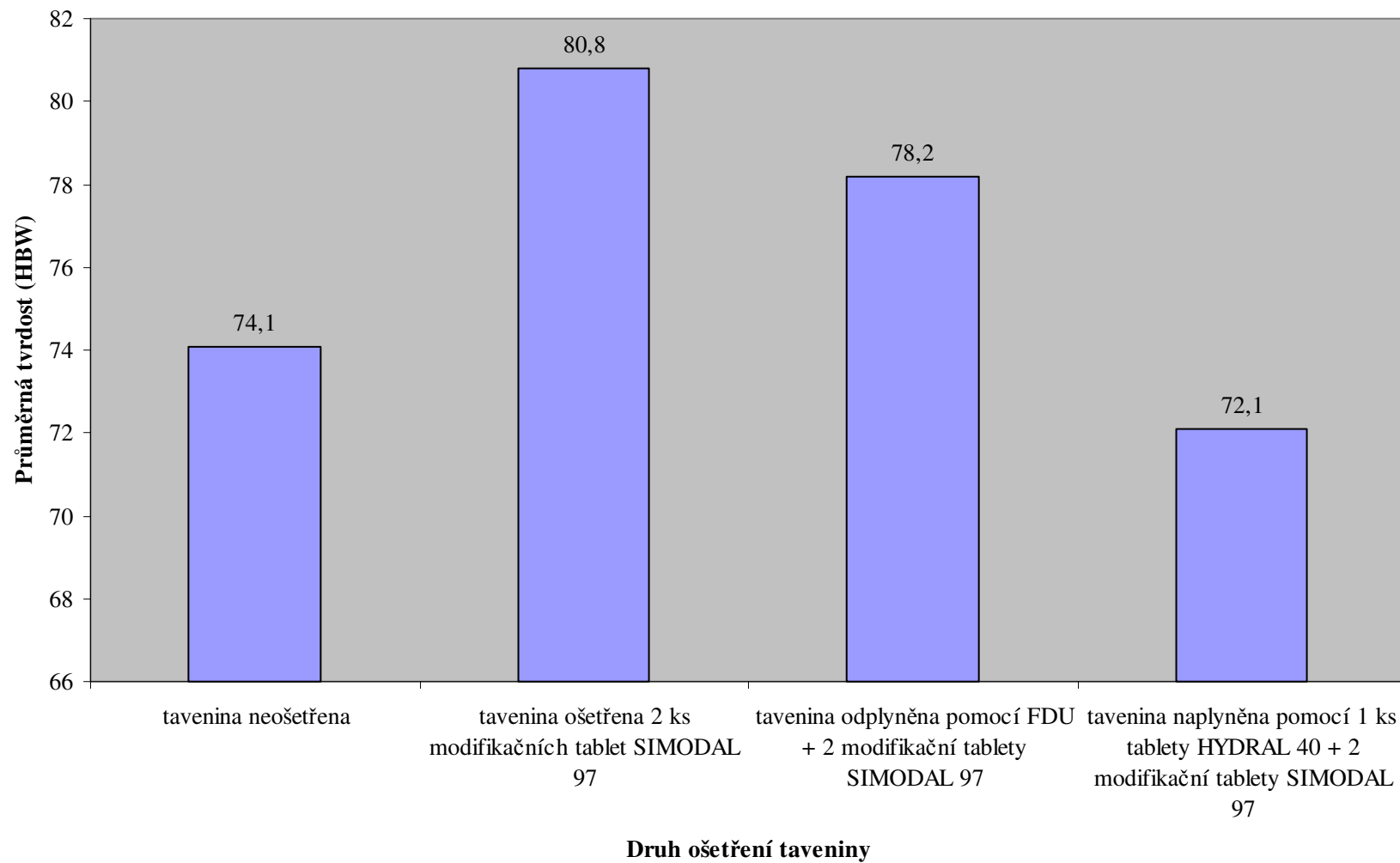
Druh ošetření taveniny	Průměrná tvrdost (HBW)	Směrodatná odchylka
1	74,1	1,52
2	80,8	1,83
3	78,2	3,25
4	72,1	3,57

Legenda:

- 1 – tavenina neošetřena
- 2 – tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97
- 3 – tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík)  
+ 2 modifikační tablety SIMODAL 97
- 4 – tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40  
+ 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Grafické znázornění této tabulky shrnutí je na následující straně.

**Graf závislosti tvrdosti na naplynění slitiny AlSi10Mg**





## 8.4. Měření meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti

Tato část byla provedena v měřicí laboratoři Technické Univerzity v Liberci příslušející katedře materiálu. Měření hodnot bylo provedeno statickou zkouškou tahem.

**Vzorek č. 1:** tavenina neošetřena

Číslo vzorku	Naměřené hodnoty		
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
1	192,31	142,31	2,73
2	184,30	134,61	2,94
3	211,39	143,66	3,88
4	176,57	133,14	2,21
5	193,03	132,54	4,67
Průměrná hodnota	191,52	137,25	3,29
Směrodatná odchylka	11,60	4,75	0,88

**Vzorek č. 2:** tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97

Číslo vzorku	Naměřené hodnoty		
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
1	229,93	137,85	7,29
2	224,26	142,85	6,45
3	220,21	141,14	6,44
4	207,90	136,50	6,98
5	232,17	144,56	9,79
Průměrná hodnota	222,89	140,58	7,39
Směrodatná odchylka	8,60	3,01	1,24

**Vzorek č. 3:** tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík) + 2 modifikační tablety  
SIMODAL 97

Číslo vzorku	Naměřené hodnoty		
	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A (%)
1	204,78	132,83	6,62
2	208,58	130,36	8,46
3	206,59	144,88	5,38
4	231,36	143,24	7,31
5	231,18	140,35	8,23
Průměrná hodnota	216,50	138,33	7,20
Směrodatná odchylka	12,12	5,74	1,12

**Vzorek č. 4:** tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety  
SIMODAL 97

Číslo vzorku	Naměřené hodnoty		
	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A (%)
1	180,29	126,05	5,25
2	187,64	126,58	4,89
3	186,47	123,39	5,63
4	196,32	127,45	6,71
5	187,16	125,25	6,73
Průměrná hodnota	187,58	125,74	5,84
Směrodatná odchylka	5,12	1,38	0,75

Následující tabulka ukazuje shrnutí průměrných hodnot meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti v závislosti na naplynění taveniny:

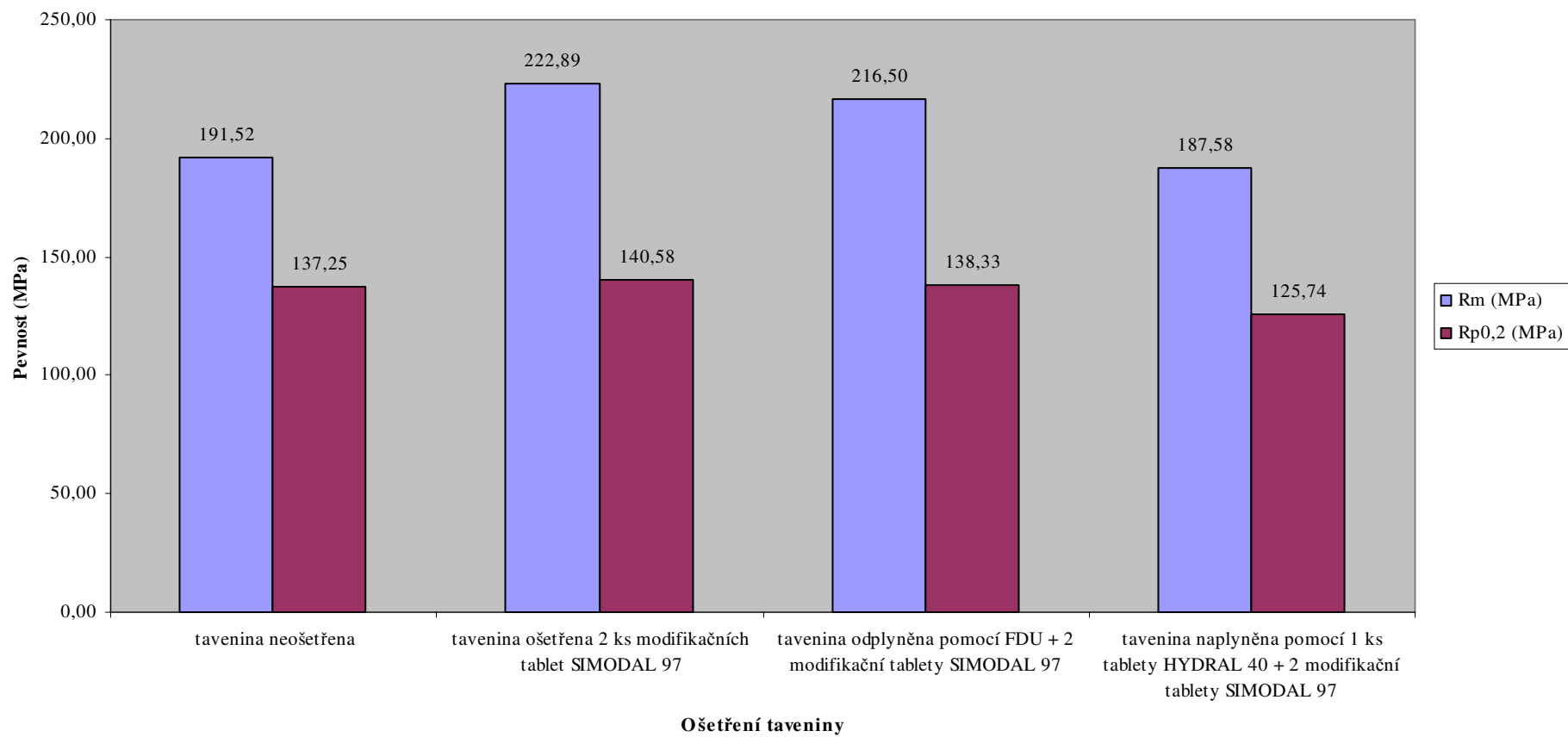
Ošetření taveniny	Průměrná hodnota					
	$R_m$ (MPa)	Směrodatná odchylka	$R_{p0,2}$ (MPa)	Směrodatná odchylka	A (%)	Směrodatná odchylka
1	191,52	11,60	137,25	4,75	3,29	0,88
2	222,89	8,60	140,58	3,01	7,39	1,24
3	216,50	12,12	138,33	5,74	7,20	1,12
4	187,58	5,12	125,74	1,38	5,84	0,75

Legenda:

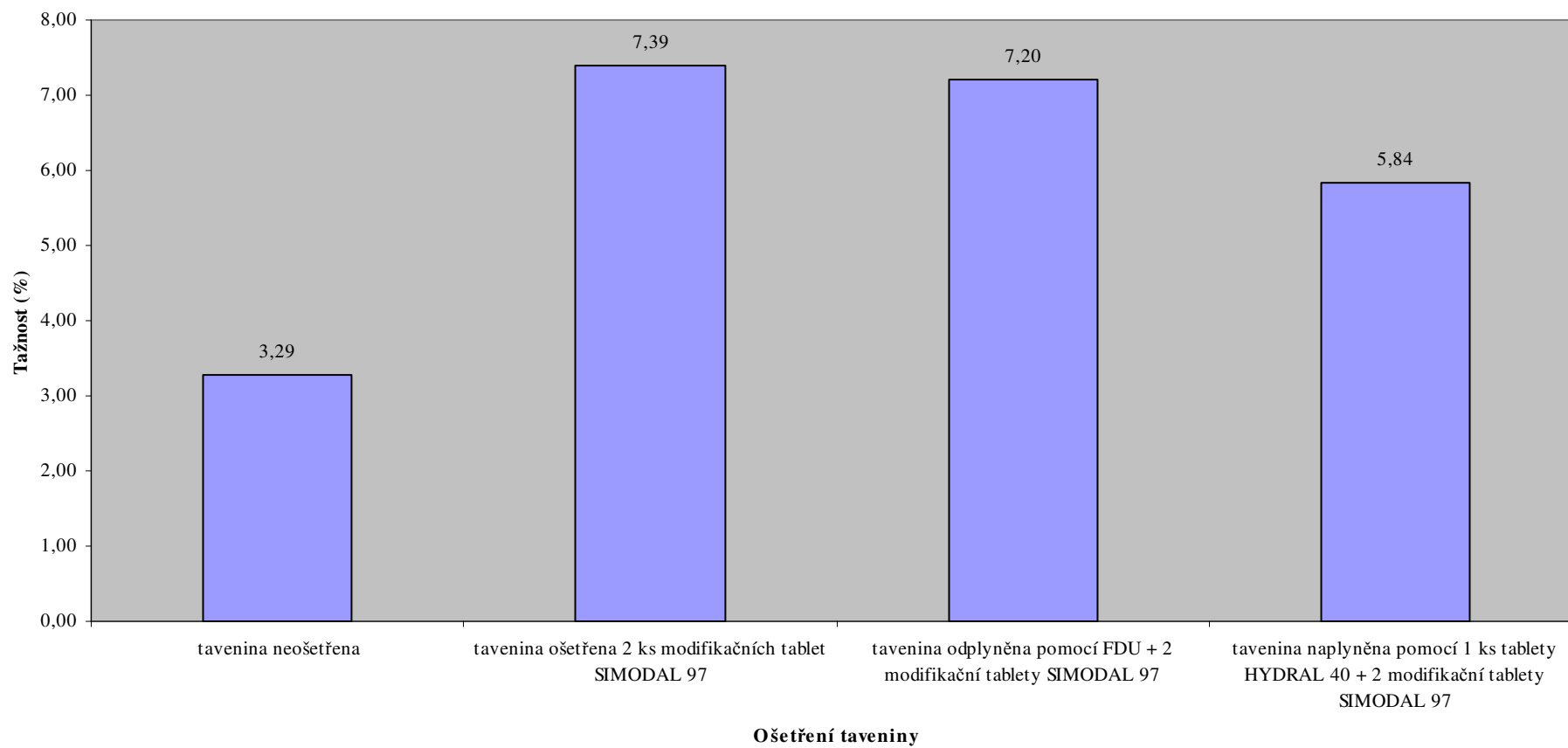
- 1 – tavenina neošetřena
- 2 – tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97
- 3 – tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík)  
+ 2 modifikační tablety SIMODAL 97
- 4 – tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40  
+ 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Grafická znázornění výsledných průměrných hodnot pro mez pevnosti, mez kluzu a tažnost jsou na následujících stranách.

**Graf závislosti meze kluzu a meze pevnosti na naplynění slitiny AlSi10Mg**



**Graf závislosti tažnosti na naplynění slitiny AlSi10Mg**



## 8.5. Mikrostruktura

Tato část byla vypracována ve spolupráci s metalografickou laboratoří Technické Univerzity v Liberci. Z každého druhu ošetření taveniny jsem zpracoval jeden reprezentativní vzorek. Zde překládám fotografie metalografických vzorků, na nichž jsou již okem patrné některé slévárenské vady:

**Vzorek č. 1:** tavenina neošetřena



**Vzorek č. 2:** tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97



**Vzorek č. 3:** tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík) + 2 modifikační tablety SIMODAL 97



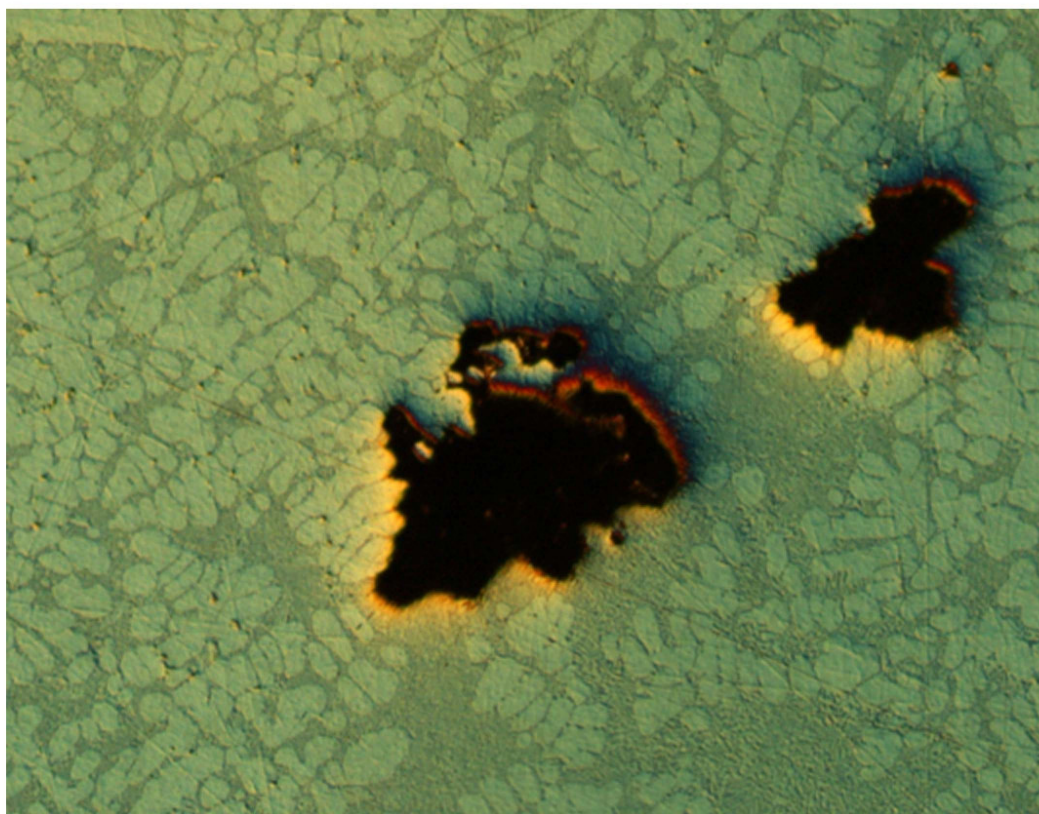
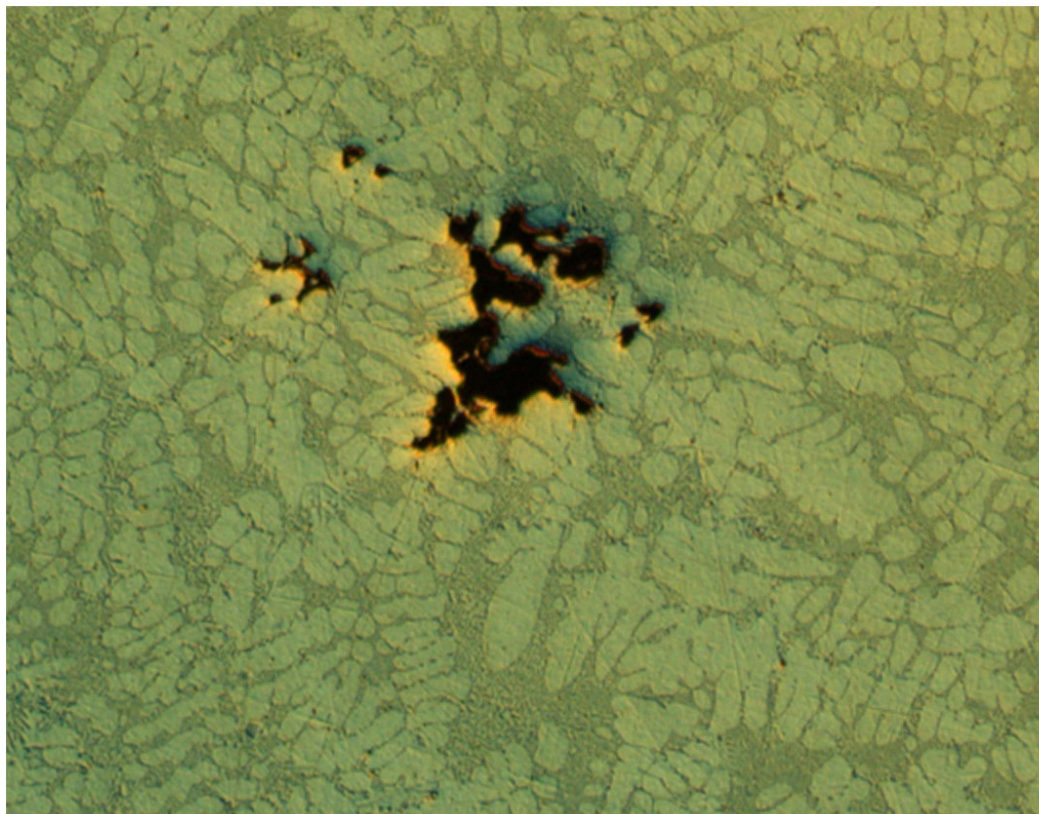
**Vzorek č. 4:** tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety SIMODAL 97



Na následujících stránkách předkládám snímky mikrostruktury. Snímky byly pořízeny při 200 a 50 násobném zvětšení. Vzorky jsou v nenaleptaném stavu.

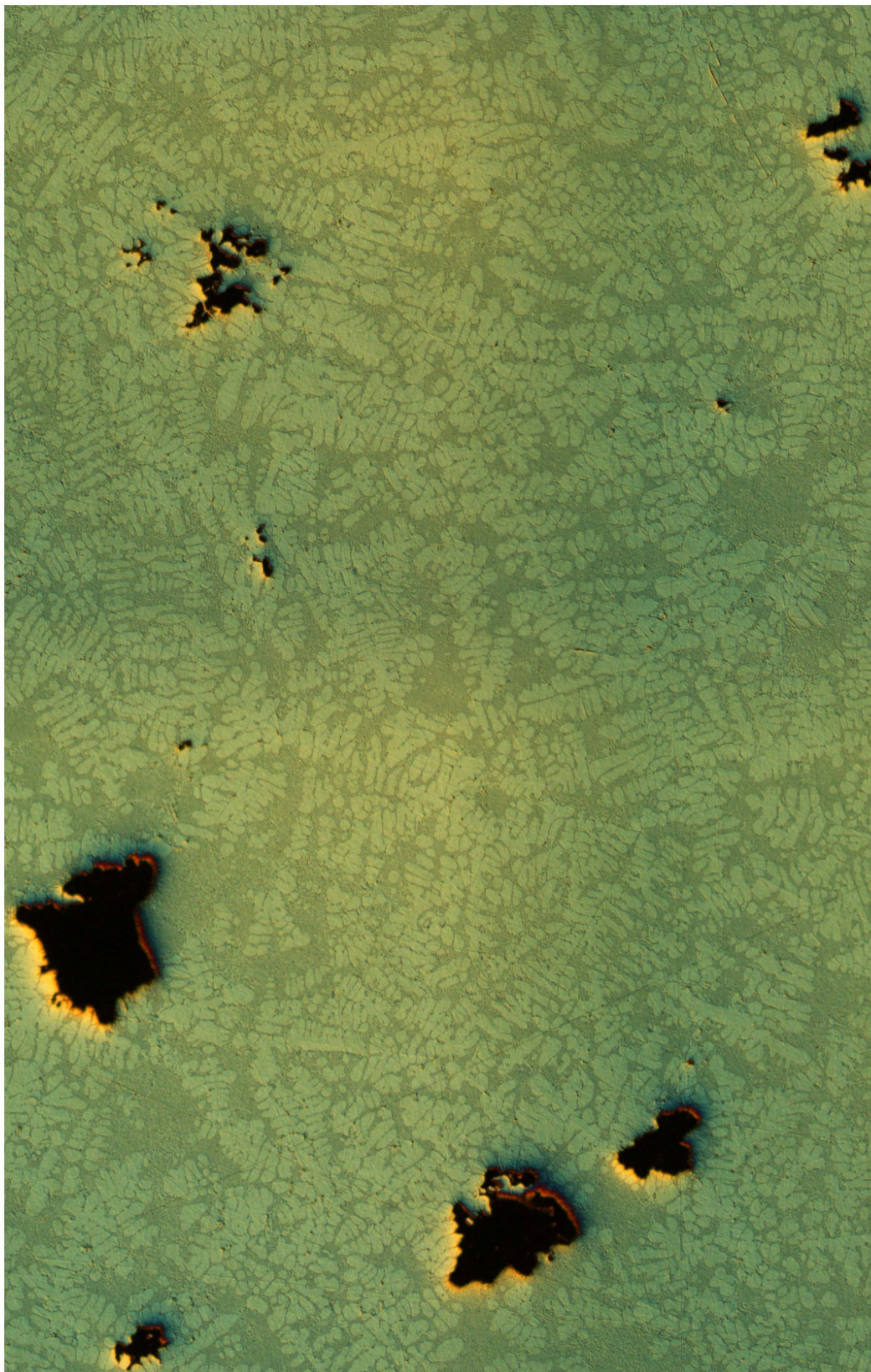


Slitina AlSi10Mg - tavenina neošetřena (zv. 200x)



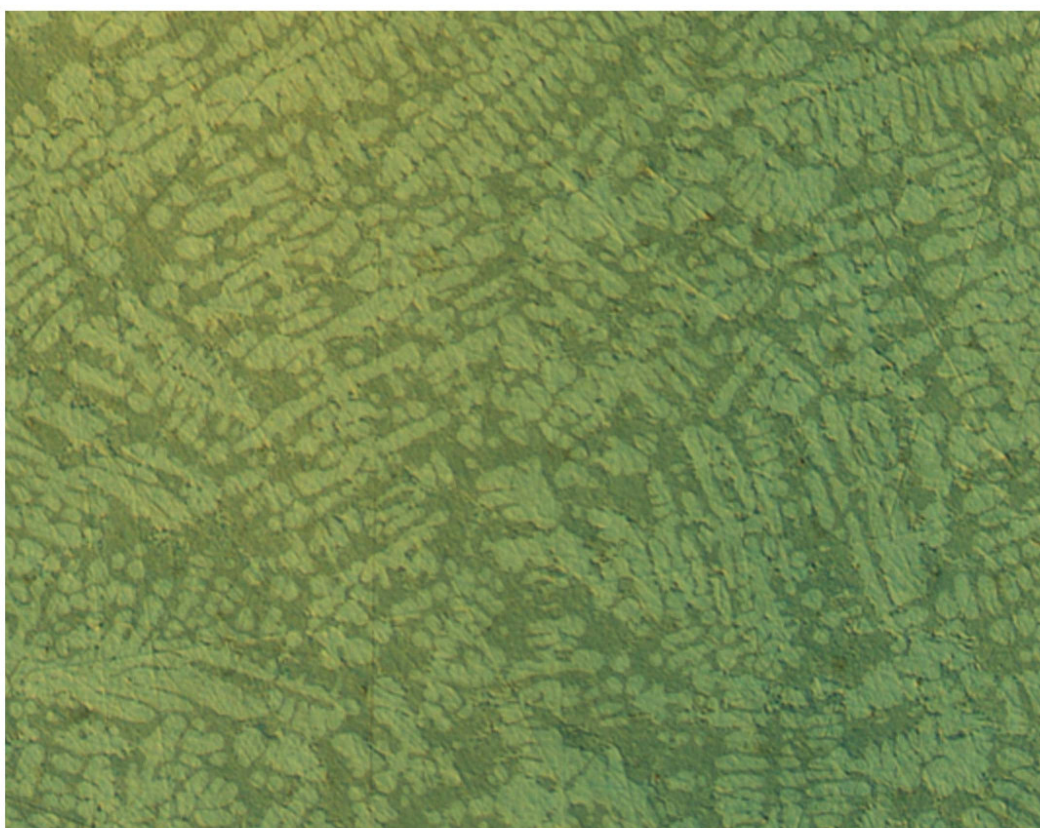
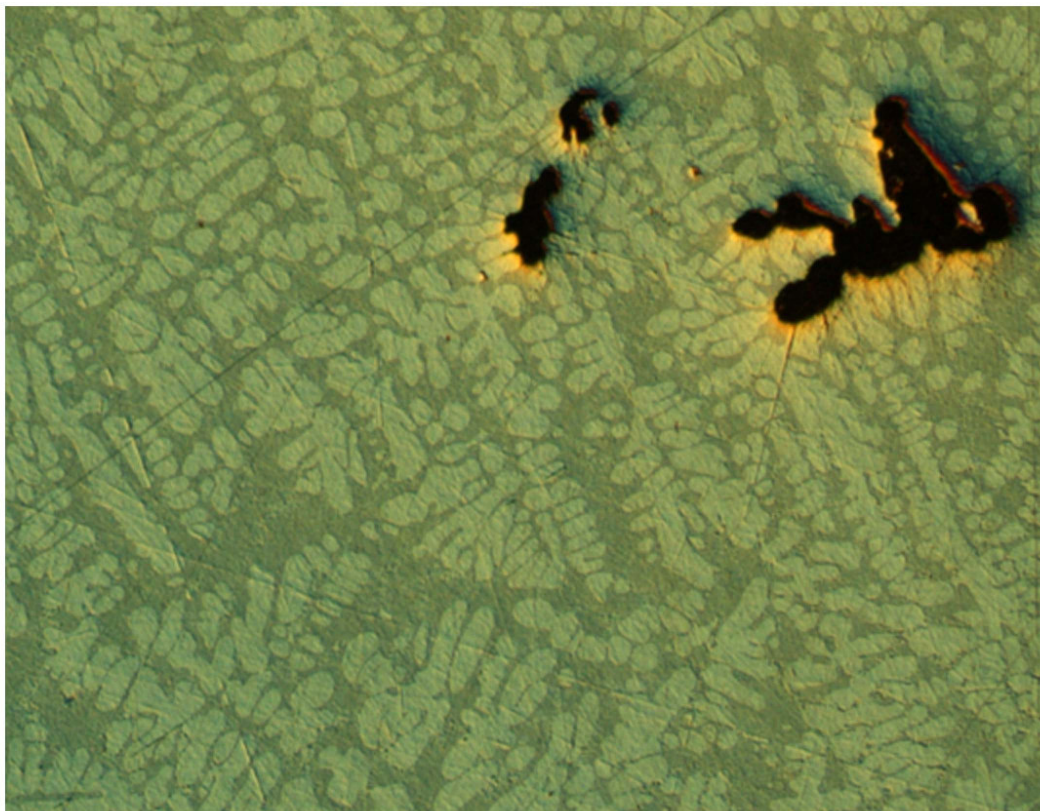


Slitina AlSi10Mg - tavenina neošetřena (zv. 50x)



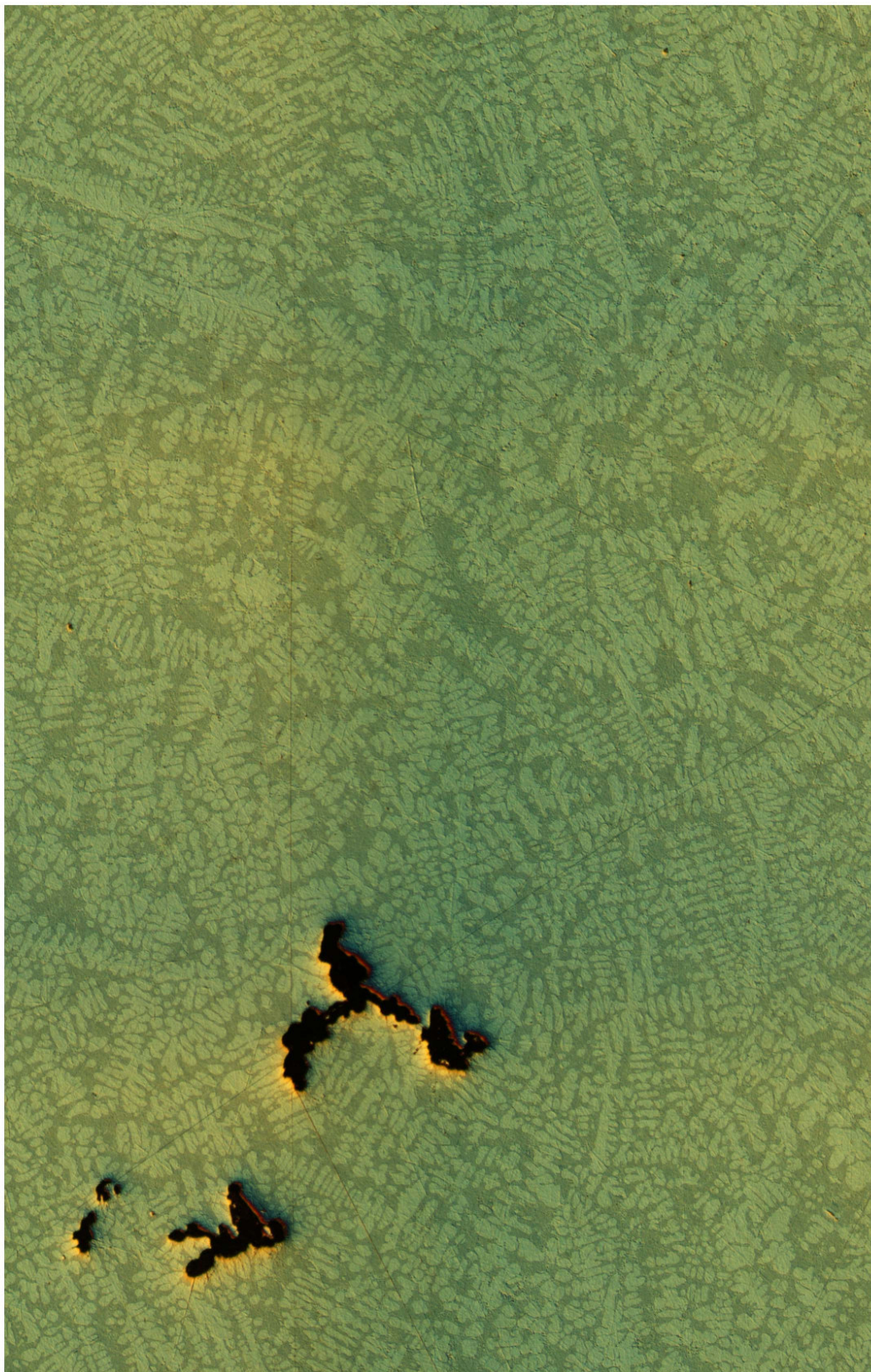


Slitina AlSi10Mg - tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97 (zv. 200x)



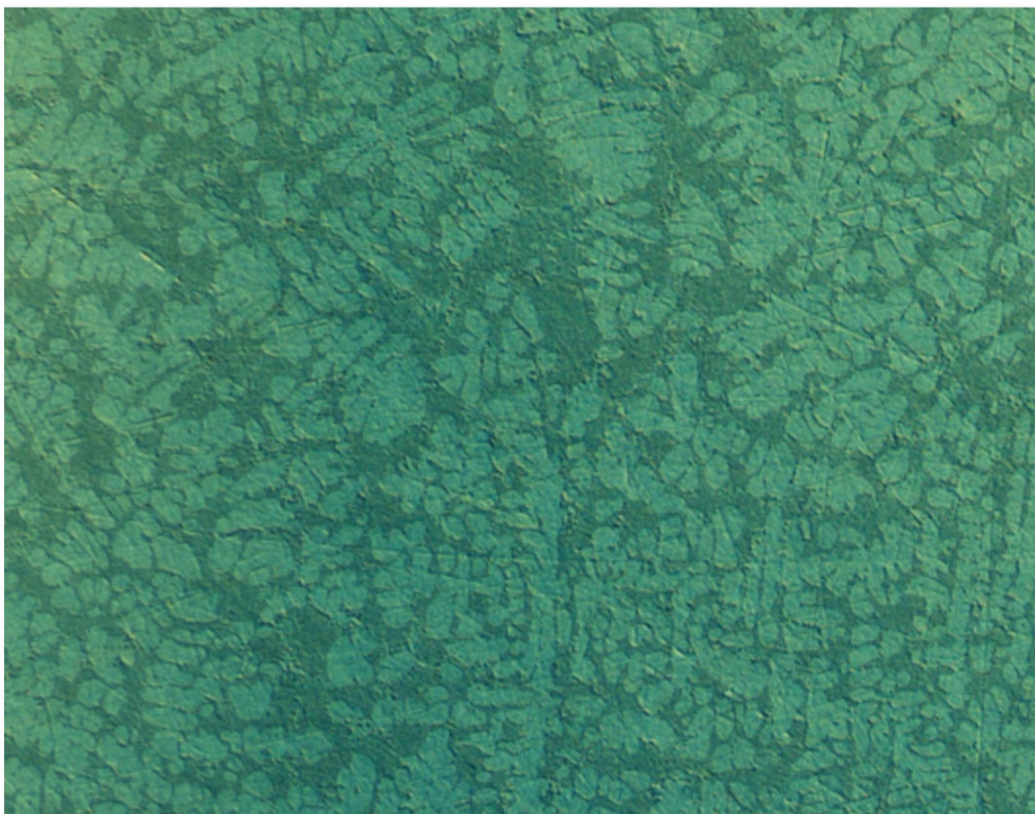


Slitina AlSi10Mg - tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97 (zv. 50x)



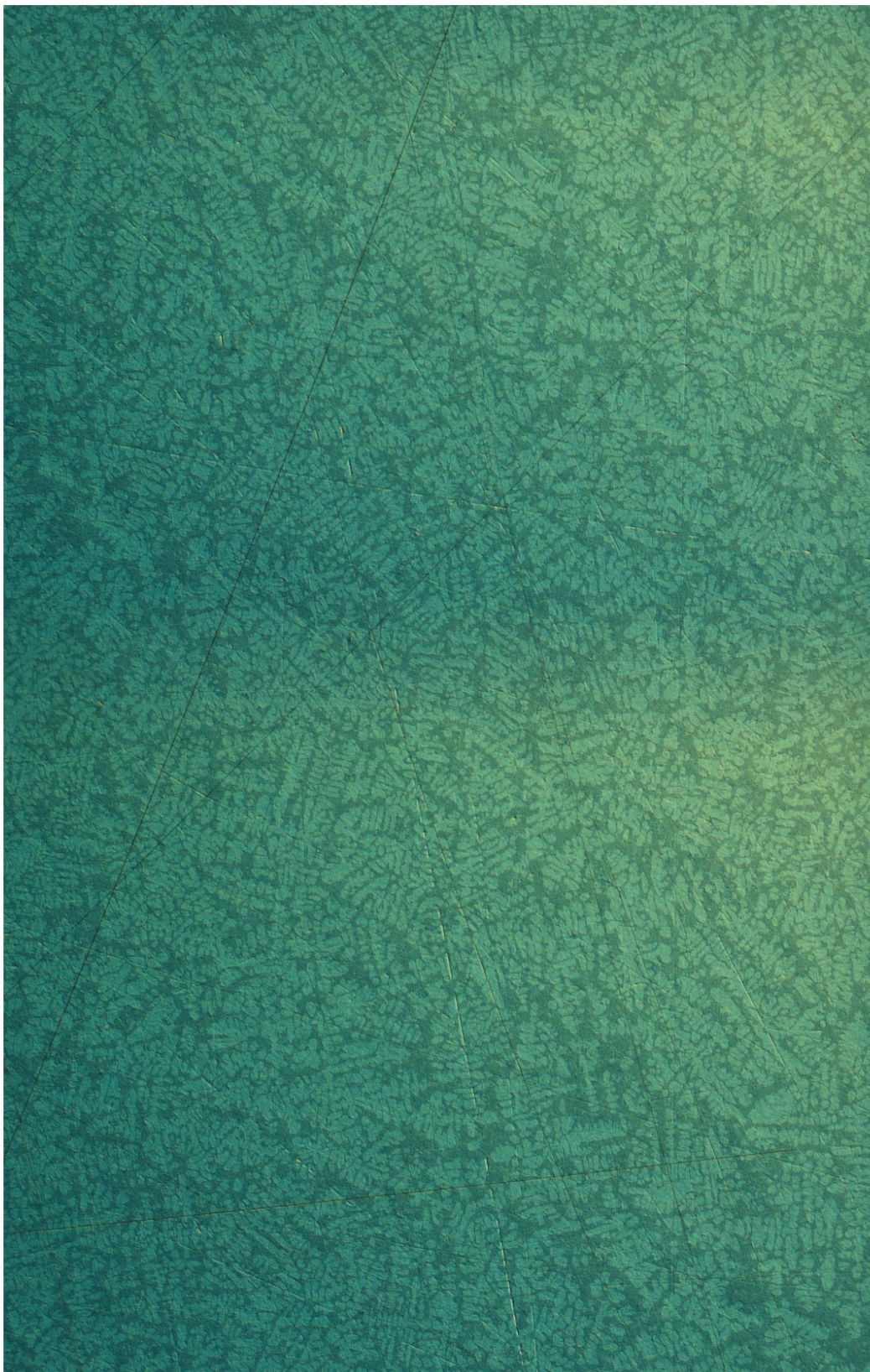


Slitina AlSi10Mg - tavenina odplyněna pomocí FDU + 2 modifikační tablety SIMODAL 97 (zv. 200x)



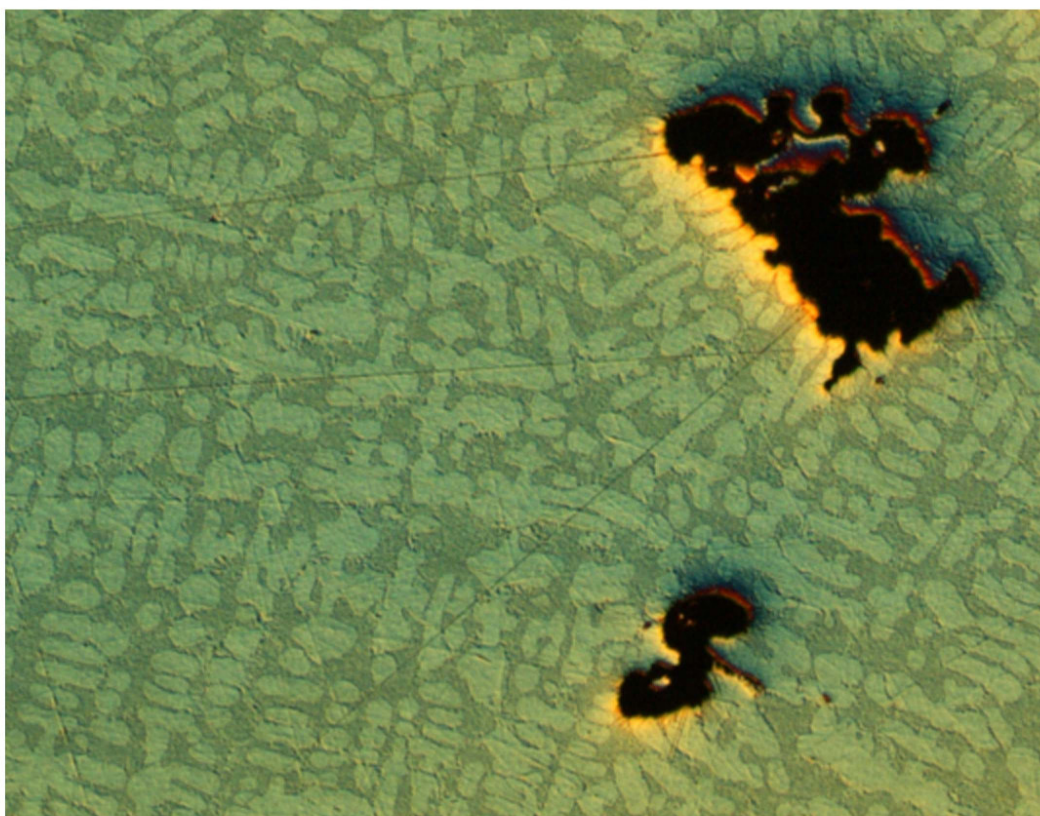
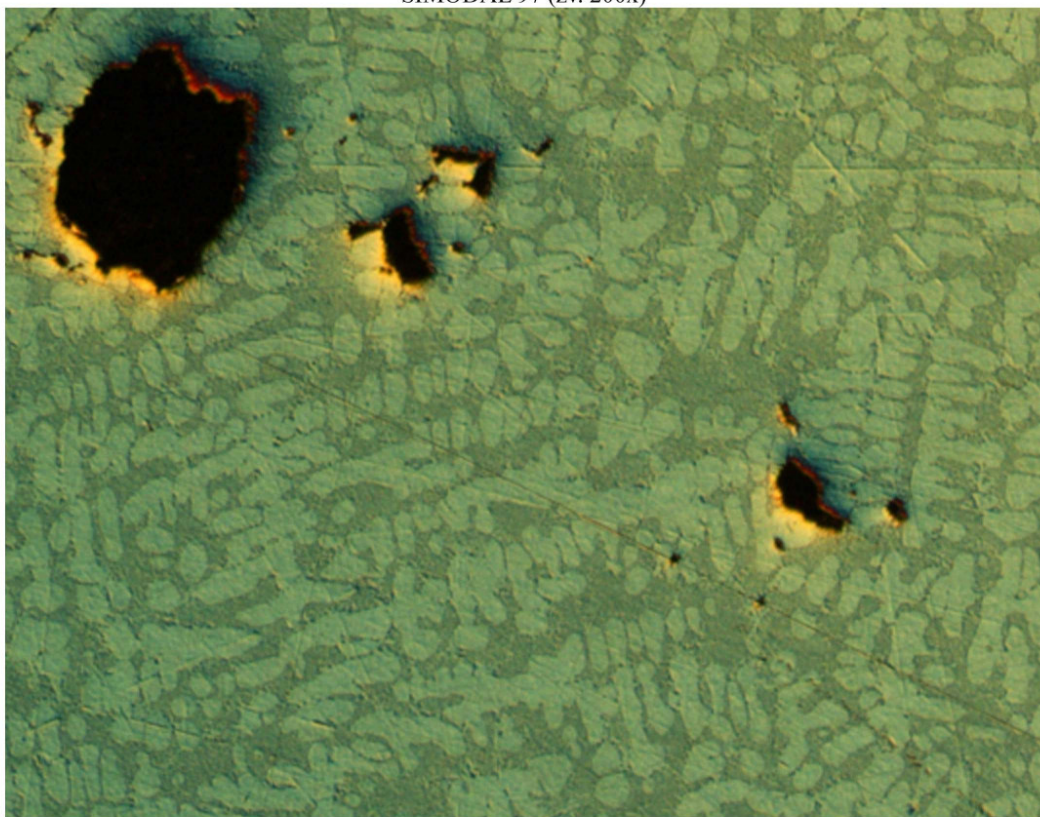


Slitina AlSi10Mg - tavenina odplyněna pomocí FDU + 2 modifikační tablety SIMODAL 97 (zv. 50x)



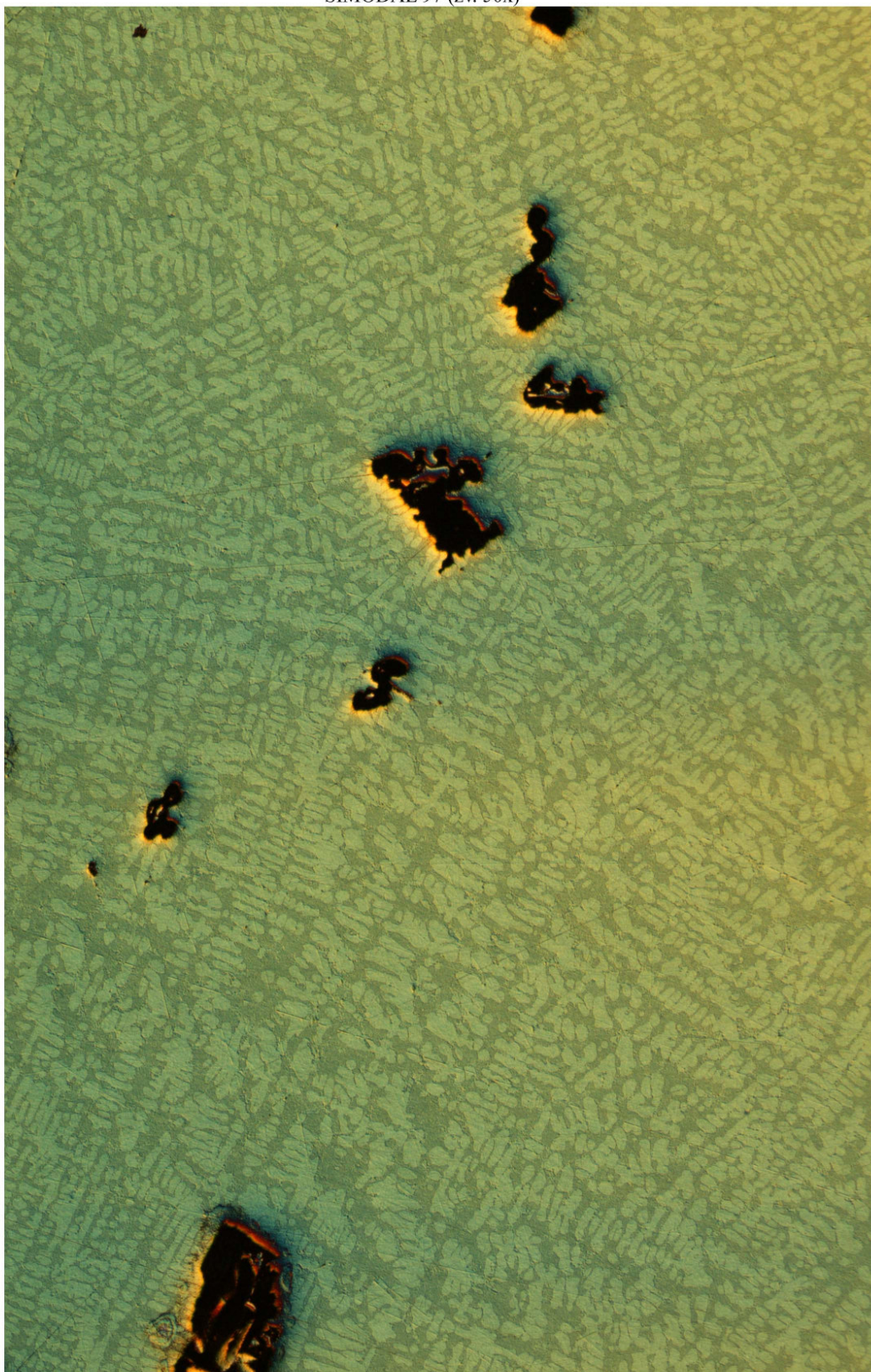


Slitina AlSi10Mg - tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety  
SIMODAL 97 (zv. 200x)





Slitina AlSi10Mg - tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety  
SIMODAL 97 (zv. 50x)





## 9. Závěr

Cílem této práce bylo určit vliv odplynění resp. naplynění na mechanické vlastnosti u slitiny AlSi10Mg (EN AC 43000 dříve ČSN 42 4331). Jako vzorová odplynění resp. naplynění uvedené slitiny byly vybrány čtyři druhy běžně používaného ošetření taveniny na kokilové slévárně ve firmě Unitherm s.r.o. sídlící v Jablonci nad Nisou. Jednotlivé druhy tavenin byly ošetřeny následovně:

- 1) tavenina neošetřena
- 2) tavenina ošetřena 2 ks modifikačních tablet SIMODAL 97
- 3) tavenina odplyněna pomocí FDU (použit plyn dusík) + 2 modifikační tablety SIMODAL 97
- 4) tavenina naplyněna pomocí 1 ks tablety HYDRAL 40 + 2 modifikační tablety SIMODAL 97

Vzorky byly odlity gravitačním litím do kovových forem a nebyly podrobeny tepelnému zpracování.

Počáteční podmínky resp. chemické složení jednotlivých složení je dáno spektrální analýzou. Z jednotlivých tabulek naměřených hodnot je patrné, že všechny vzorky mají vyšší obsah mědi než připouští norma ČSN. Běžně povolená hodnota je 0,050% a vzorky tuto hodnotu překračují max. o 0,008%. Tato skutečnost může být ovlivněna řadou faktorů, např. používáním stejných tavících a udržovacích pecí pro různé typy slitin Al-Si.

Aby bylo možné rozlišit jak jednotlivé druhy ošetření taveniny ovlivňují odplynění resp. naplynění, provedl jsem běžně dostupnou metodu dvojího vážení. Výsledek potvrzuje základní předpoklady získané z praxe. Nejvíce odplyněná je tavenina, která byla odplyněna pomocí FDU za použití plynu dusíku a následně modifikována pomocí tablet SIMODAL 97 (index DI = 1,23%). O něco vyšší naplynění vykazují vzorky, u nichž nebyla tavenina ošetřena (index DI = 2,94%). U tohoto „ošetření“ hraje důležitou roli např. dodavatel materiálu jež výraznou měrou ovlivňuje kvalitu materiálu a to z hlediska právě sledovaného odplynění resp. naplynění. Dále se může na výsledku podílet způsob a podmínky tavení materiálu ve slévárně, kde významnou roli hraje i lidský faktor, který ostatně hraje neméně důležitou roli u ostatních druhů ošetření taveniny. Mezi další faktory ovlivňující naplynění jsou např. skladovací prostory, kde by měl být minimální obsah vlhkosti, dále pak použité nástroje nebo tablety s nimiž se tavenina dále ošetřuje apod. Vyšší naplynění než neošetřená

tavenina měla tavenina modifikovaná tabletami SIMODAL 97 (index DI = 3,15%). Z tohoto výsledku je patrné, že na odplynění resp. naplynění taveniny má vliv i proces samotné modifikace - modifikace má mírně naplyňující účinek. Jako nejvíce naplyněná byla pochopitelně vyhodnocena tavenina jež byla naplyněna pomocí speciálních tablet HYDRAL 40 a modifikována tabletami SIMODAL 97 (index DI = 4,20%).

Z provedených hlavních měření byl zjištěn určitý vliv odplynění resp. naplynění na tvrdosti, pevnosti a tažnosti slitiny. Největší pevnost a tvrdost vykazuje slitina jež byla pouze modifikována. Nejnížší tyto vlastnosti vykazuje slitina, která byla naplyněna tabletami. Skutečnost, že naplyněný materiál má nejnížší pevnost a tvrdost je, dle mého názoru, dána velkým množstvím pórů které obsahuje, jak dokládají i snímky mikrostruktury a metalografických vzorků. Dle mého názoru přítomné póry v podstatě zmenšují množství materiálu v průřezu, které by bylo schopné odolávat vnějšímu zatížení (pevnost) nebo případnému vnikání cizích těles (tvrdost). Póry pak mohou působit rovněž jako zárodky staženin v průběhu odlévání a jako zárodky trhlin, jež napomáhají předčasnému porušení namáhaného materiálu a tím znemožňují jeho další použití. Snímky mikrostruktury vzorků naplyněných opět potvrzují teoretický předpoklad tvaru pórů. Póry mají většinou členitý tvar daný způsobem jejich vzniku. Póry nebo též porezita vzniká v materiálu kombinací tvorby bublin a mikrostaženin. Domnívám se, že důležitou roli může na pevnostní vlastnosti mít i rozmístění pórů v materiálu. Nižší pevnost bude vykazovat místo v materiálu, kde jsou lokální shluky pórů, což jsou například místa tepelných uzlů, a naproti tomu materiál, kde budou póry rozmístěny rovnoměrně po celém průřezu, by mohl vykazovat pevnost vyšší.

Opět byl prokázán pozitivní vliv úpravy slitiny - modifikace na pevnost, tažnost a tvrdost. Vliv modifikace je patrný již ze snímků mikrostruktury, kde modifikovaná tavenina vykazuje globulárnější strukturu eutektika (šedé plochy na mikrostruktuře) a jemnější rozptýlení fáze alfa – substituční tuhý roztok křemíku v hliníku (světlé plochy na mikrostruktuře) než tavenina neošetřená. Výsledkem přítomnosti těchto struktur jsou pak lepší mechanické vlastnosti.

Závěrem mohu říci, že mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost mají přibližně pro všechny druhy odplyněných resp. naplyněných slitin podobný průběh. Přičemž jako slitina vykazující nejnížší jmenované vlastnosti je slitina naplyněná tabletou HYDRAL 40 a modifikovaná tabletami SIMODAL 97. O něco lepší je slitina u níž tavenina nebyla ošetřena, dále pak slitina jež byla odplyněna pomocí FDU a modifikována tabletami SIMODAL 97 a jako slitina s nejlepší mezí pevnosti, mezí kluzu a tvrdostí se jeví slitina modifikovaná pomocí tablet

SIMODAL 97. Dle naměřených hodnot rozdíl v tvrdosti mezi slitinou s nejlepšími a nejhoršími vlastnostmi není příliš veliký a činí zhruba 8 HBW, zatímco rozdíl v pevnosti (konkrétně mez pevnosti) činí až 35 MPa. U meze kluzu je rozdíl asi 14 MPa. Jiný průběh vykazuje porovnání tažností zkoušených slitin. Nejhorší tažnost má slitina neošetřená. Lepší tažnost má slitina naplyněná pomocí tablety HYDRAL 40 a modifikovaná tabletami SIMODAL 97, dále pak je slitina odplyněná pomocí FDU a modifikovaná tabletami SIMODAL 97 a nakonec nejlepší tažnost vykazuje slitina modifikovaná tabletami SIMODAL 97. Skutečnost, že nejhorší tažnost má slitina u níž nebyla tavenina ošetřena, je dle mého soudu, dána opět pozitivním vlivem modifikace na strukturu a vlastnosti slitin Al-Si. Rozdíl mezi nejhorší a nejlepší tažností činí přibližně 4%.

## Seznam použité literatury

- [1] Roučka J.: Metalurgie neželezných slitin, Akademické nakladatelství CERM, VUT Brno 2004
- [2] Chvojka J., Brzobohatý M.: Zpracování a použití hliníku a jeho slitin, SNTL Praha 1961
- [3] Kolektiv autorů: Příručka o hliníku, SNTL Praha 1969
- [4] Pluhař J., Koritta J.: Strojírenské materiály, SNTL Praha 1981
- [5] Materiály firmy UNITHERM s.r.o.
- [6] Kolektiv autorů: Encyklopedie hliníku, Adin s.r.o., Prešov 2005
- [7] Internetová stránka: <http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/441762-bauxit>
- [8] Internetová stránka: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Henri\\_Sainte-Claire\\_Deville](http://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Sainte-Claire_Deville)
- [9] Beneš A. a kolektiv: Kovové materiály, SNTL, Praha 1968
- [10] Internetová stránka:  
<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=14803&part=fulltext>
- [11] Macek K., Zuna P., Zilvar V.: Nauka o materiálu III, SNTL Praha 1987
- [12] Propagační materiály firmy SCHAFER CHEMISCHE FABRIK GMBH